

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE



LIBEREC 2011

MIROSLAVA FILIPU

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

KATEDRA NETKANÝCH TEXTILÍ

Studijní program: M3106 Textilní inženýrství

Studijní obor: 3106T004/90 – 1 Netkané textilie

**FILTRACE OLEJE VE SPALOVACÍM MOTORU S VYUŽITÍM
NANOVLÁKEN**

**OIL FILTRATION IN THE COMBUSTION ENGINE WITH USE
NANOFIBERS**

Autorka diplomové práce: Miroslava Filipu

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Hrůza, Ph.D.

Počet stran textu: 67

Počet obrázků: 20

Počet tabulek: 3

Počet grafů: 9

Počet příloh: 3

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená *diplomová* práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním *diplomové* práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne

.....

Miroslava Filipu

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce panu **Ing. Jakubu Hrůzovi Ph.D** za vedení diplomové práce, odborné rady, cenné připomínky a čas strávený při konzultacích.

Anotace

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku filtrace kapalin, zejména filtrace oleje ve spalovacím motoru s využitím nanovláken a způsoby jejího hodnocení. Zabývá se také problematikou výroby nanovláken metodou elektrostatického zvlákňování a její modifikace Nanospider. Cílem práce je příprava testovacího zařízení filtračních vlastností, které bude sloužit k simulaci filtrace oleje v motorovém systému, a následné testování filtračních vlastností PVA nanovláknenných vrstev různých plošných hmotností s cílem nalézt plošnou hmotnost optimální pro filtraci oleje a zlepšit stávající vlastnosti filtračních materiálů používaných pro olejové filtry. Sledovanými vlastnostmi jsou zejména odolnost vůči působícímu prostředí, propustnost oleje a efektivita filtrace.

Annotation

This diploma work deals with the liquid filtration, especially with the oil filtration in the combustion engine with use nanofibers and methods of evaluation. It also deals with issues of production of nanofibers by electrospinning and its modification Nanospider. Main aim of the diploma work is to prepare test equipment of filtration properties, which it will to simulate oil filtration in the combustion engine, and subsequent testing filtration properties with layers of PVA nanofibers of different weights in order to find the optimal weight for oil filtration and improve the existing properties of filter materials used for oil filters. Surveyed properties are particularly resistance to injurious environment, oil permeability and filter efficiency.

Klíčová slova

Efektivita filtrace

Elektrostatické zvlákňování

Kapalinová filtrace

Nanovlákná

Prodyšnost

Key words

Filter efficiency

Electrospinning

Liquid filtration

Nanofibers

Permeability

OBSAH:

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	9
1 ÚVOD	10
2 TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1 Filtrace	11
2.1.1 Definice filtrace.....	11
2.1.2 Typy filtrace.....	12
2.2 Filtrační mechanismy	13
2.3 Filtrační parametry	15
2.3.1 Parametry filtračního materiálu.....	15
2.3.2 Parametry filtrovaných částic.....	17
2.3.3 Parametry procesu filtrace.....	18
2.4 Filtrační vlastnosti	19
2.5 Kapalinová filtrace	21
2.5.1 Aplikace	21
2.6 Filtrace oleje v automobilovém průmyslu	21
2.6.1 Historie oleje	21
2.6.2 Druhy olejů	22
2.6.3 Motorový olej a jeho viskozita.....	22
2.6.4 Nečistoty a saze v motorovém oleji	23
2.6.5 Vliv sazí na viskozitu	24
2.7 Olejové filtry	25
2.7.1 Rozdělení olejových filtrů	25
2.7.2 Materiály olejových filtrů a jejich vlastnosti	27
2.7.3 Jednotlivé části olejového filtru.....	28
2.7.4 Zapojení olejového filtru v motoru automobilu	29
2.8 Stanovení množství nečistot v oleji.....	31
2.8.1 Kapkový test	31
2.8.2 Membránová filtrace.....	31
2.8.3 Odstřeďování	32
2.8.4 Moderní způsoby stanovení nečistot a sazí.....	32
2.9 Hodnocení filtračních materiálů	33
2.9.1 Multipass Test – ISO 16889	33
2.9.2 Dynamická účinnost filtrů – DFE (Dynamic Filter Efficiency).....	35
2.10 Výroba nanovláken	35
2.10.1 Nanovlákná	35

2.10.2	Vlastnosti nanovláken	36
2.10.3	Elektrostatické zvlákňování a jeho modifikace Nanospider	36
2.10.4	Struktura nanovláken	38
2.10.5	Výhody a nevýhody nanovláken v kapalinové filtraci	39
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	40
3.1	Cíl práce.....	40
3.2	Použitý materiál.....	41
3.3	Testování prodyšnosti vzduchu	41
3.4	Určení propustnosti oleje nanovláknenného filtru	44
3.4.1	Popis zařízení simulujícího filtraci oleje	44
3.4.2	Měření a výsledky koeficientu propustnosti oleje.....	45
3.5	Vyhodnocení efektivity PVA nanovláknenného filtru	48
3.5.1	Zastoupení částic nečistot v oleji na základě mikroskopického.....	48
	zhodnocení	48
3.5.2	Histogram efektivity PVA nanovláknenného filtru	52
4	ZÁVĚR	56
5	POUŽITÁ LITERATURA	58
6	SEZNAM PŘÍLOH	61

Seznam použitých symbolů a zkratek

d_p	ekvivalentní průměr póru [m]
Q	průtok vzduchu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
A	plocha vrstvy [m^2]
h	tloušťka filtru [m]
k	koeficient propustnosti filtru [m^2]
E	efektivita zachycených částic [%]
G_1	množství částic nezachycených filtrem [g]
G_2	celkové množství částic nalétávající na filtr [g]
P	průnik [-]
Δp	tlakový spád [Pa]
p_1	tlak filtrovaného média před filtrem [Pa]
p_2	tlak filtrovaného média za filtrem [Pa]
$E_{\text{stř}}$	střední hodnota efektivit [%]
J	jímavost filtru [g]
m	hmotnost [g]
η	dynamická viskozita vzduchu [Pa.s]
μm	mikrometr, 10^{-6} [m]
nm	nanometr, 10^{-9} [m]
OEM	obchodní termín, který označuje výrobce zařízení, jenž při výrobě používá díly, komponenty a zařízení od jiných výrobců, a hotový výrobek prodává pod svou vlastní obchodní značkou (Original Equipment Manufacturer)
SAE	klasifikační systém viskozitních tříd (Society of Automotive Engineers)
API	americká norma (American Petroleum Institute)
ACEA	evropská norma (Association des Constructeurs Européens d' Automobiles)
VW	evropská norma (Volkswagen Group)
PVA	polyvinylalkohol
viz.	prohlédni
např.	například
obr.	obrázek
tzv.	tak zvané
atd.	a tak dále
příp.	případně
apod.	a podobně

1 ÚVOD

Nanovlákná a jejich aplikace jsou odborníky na celém světě považovány za materiály třetího tisíciletí. Stále více nalézají uplatnění v oblasti, kde to původně nikdo nečekal. V současné době umožnila výroba nanovláken znatelný pokrok v péči o zdraví – v cílené dopravě léků, v regeneraci biokompatibilní tkáně a ve vývoji nanokatalyzátorů. Výroba nových struktur nanovláken může vést k významnému zlepšení užitných vlastností konečných produktů např. v dopravě, optice a bezpečnosti, energetice.

V dnešní době je ve světě používáno velké množství druhů filtrů v různých aplikacích. Filtry jsou tradičně využívány v různých průmyslových segmentech a se zvyšující se poptávkou vozidel, se zvyšuje i poptávka po filtrech. Automobilový průmysl je největším odběratelem a spotřebitelem olejových a palivových filtrů. Olejové a vzduchové filtry patří mezi dva nejrozšířenější produkty vytvářející příjmy a růst segmentu filtrů v automobilovém průmyslu.

Filtrační průmysl byl první, který začal používat nanovlákná v široké výrobní škále a porozuměl tak teoretickým aspektům jemných vláken ve filtračních médiích. Nanovlákná zaručují vysoký počáteční výkon malých částic a jsou schopná výrazně zvýšit nízký výkon aplikováním nanovláken do podkladového materiálu. V automobilovém průmyslu je velké množství potenciálního využití nanovláknenných materiálů. Požadavky na filtraci v moderních vozidlech se zvyšují v důsledku vyššího výkonu motoru, přísnější environmentální legislativy a zvýšení nároků zákazníků s ohledem na bezpečnost silničního provozu a pohody ve vozidle.

Olejové filtry jsou nepostradatelnou součástí mazacího systému v motoru vozidla. Jejich vzhled, konstrukce a filtrační materiál se v průběhu let v závislosti na vývoji trhu a požadavku zákazníka hodně mění. Olejové filtry vyrobeny s použitím nanovláknenných materiálů by mohly přinést celou řadu výhod, jako jsou delší servisní intervaly, prodloužená životnost motoru (větší ochrana motoru), zlepšení toku oleje, snížení provozních nákladů. Běžné filtrační vložky olejových a palivových filtrů jsou v mnoha případech vyrobeny z celulózových vláken, které nejsou konzistentní ve velikosti a tvaru, což umožňuje procházení větších nečistot a vede k většímu poškození motoru. Nanovlákná díky svým malým průměrům a konzistenci tvaru a velikosti umožňují zachytávat menší částice, a tak zadržovat více nečistot.

Náplň této práce spočívá v přípravě testovacího zařízení filtračních vlastností a následném testování filtračních vlastností nanovláknenných vrstev různých parametrů s cílem zlepšit stávající vlastnosti filtračních materiálů používaných pro olejové filtry. Sledovanými vlastnostmi budou zejména odolnost vůči působícímu prostředí a efektivita filtrace.

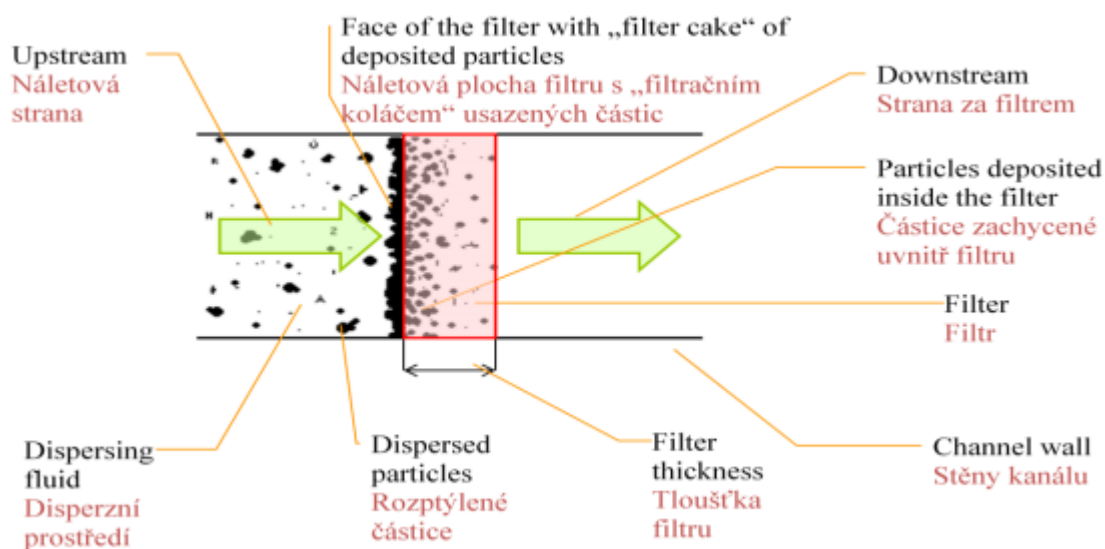
2 TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části této diplomové práce se budeme zabývat nejdříve problematikou filtrace, jejími typy, mechanismy, parametry a vlastnostmi. Zaměříme se na filtraci kapalin, přesněji filtraci oleje v automobilovém průmyslu, kde probereme problematiku olejů, olejových filtrů a možnosti stanovení množství nečistot v oleji a hodnocení filtračních materiálů. V poslední části se seznámíme s nanovláknny, technologií jejich přípravy pomocí metody elektrostatického zvlákňování a její modifikace Nanospider a výhodami a nevýhodami jejich použití v automobilovém průmyslu.

2.1 Filtrace

2.1.1 Definice filtrace

Filtrace je proces oddělování rozptýlených částic z disperzního prostředí pomocí porézního média (v našem případě vláknenného útvaru). Disperzní prostředí může být plynné (vzduch), nebo kapalná (voda, olej, palivo). Částice mohou být pevné, nebo kapalná (aerosol).[1] Jako filtr se nejčastěji v laboratorní chemii používá filtrační papír. Disperze filtrem protéká, zatímco pevné částice filtr zachycuje.[2]



Obr. 1 Schéma procesu filtrace.[1]

Obr.1 ukazuje základní představu procesu filtrace a pojmů, jež se jí týkají. Rozptýlené částice jsou umístěny v disperzním prostředí, ze kterého některé nalétávají na plochu filtru, kde se zachytí a vytvoří vrstvu tzv. filtrační koláč a některé se zachytí uvnitř filtru. Průchod filtrem zbaví filtrovanou disperzi dispergovaných částic.

2.1.2 Typy filtrace

Filtraci dělíme ze tří pohledů a to na filtraci podle disperzního prostředí, podle velikosti filtrovaných částic a podle způsobu filtrace.

1. Podle disperzního prostředí

- Vzduchová filtrace
- Kapalinová filtrace

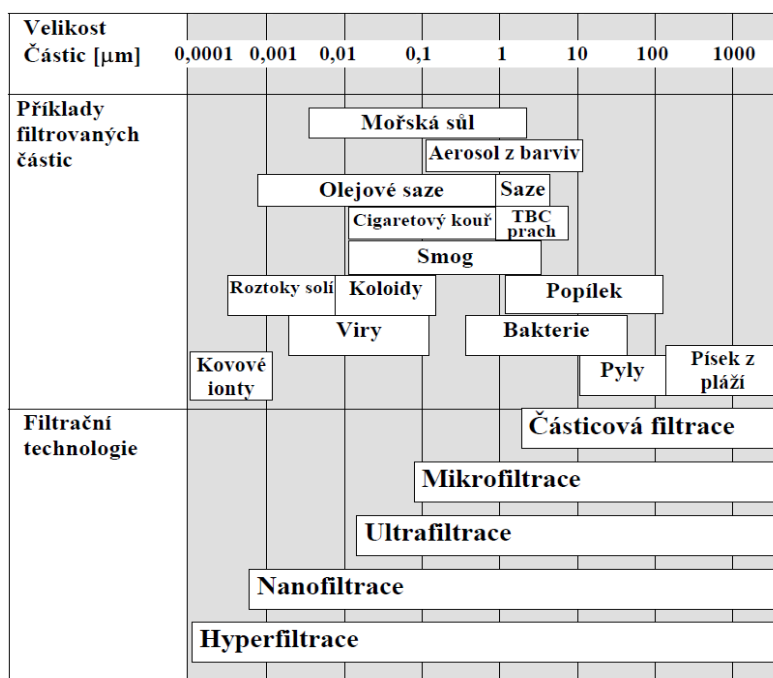
2. Podle velikosti filtrovaných částic

- Hrubá filtrace $10^{-6} \text{ m} < d_p$
- Mikrofiltrace $10^{-7} < d_p < 10^{-6}$
- Ultrafiltrace $10^{-8} < d_p < 10^{-7}$
- Nanofiltrace $10^{-9} < d_p < 10^{-8}$
- Reverzní osmóza $d_p < 10^{-9}$

Filtrační technologie a jejich příklady filtrovaných částic jsou znázorněny na obr. 2.

3. Podle způsobu filtrace

- Plošná filtrace
- Hloubková filtrace

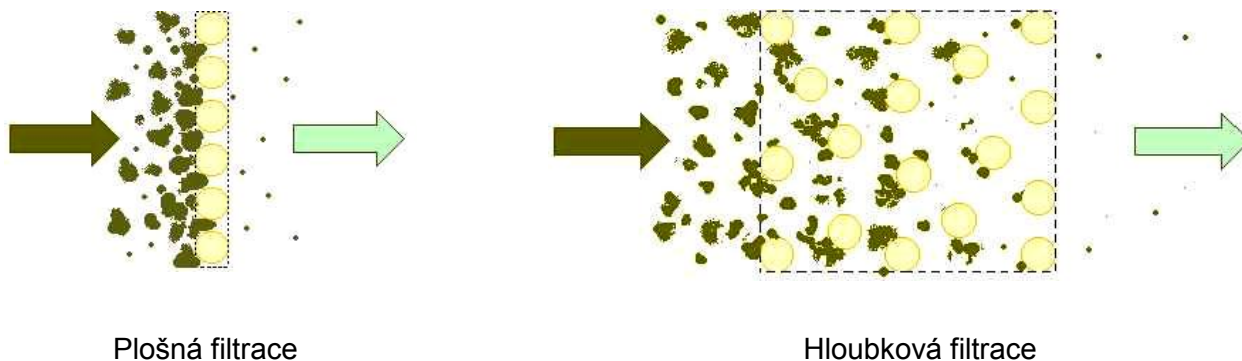


Obr. 2 Filtrační technologie a jejich příklady filtrovaných částic rozdělených podle jejich velikosti.[3]

2.2 Filtrační mechanismy

Teorie filtrace popisuje vztah mezi vstupními parametry, které buď můžeme nastavit, nebo je alespoň můžeme změřit a výslednými vlastnostmi, které chceme získat.[1]

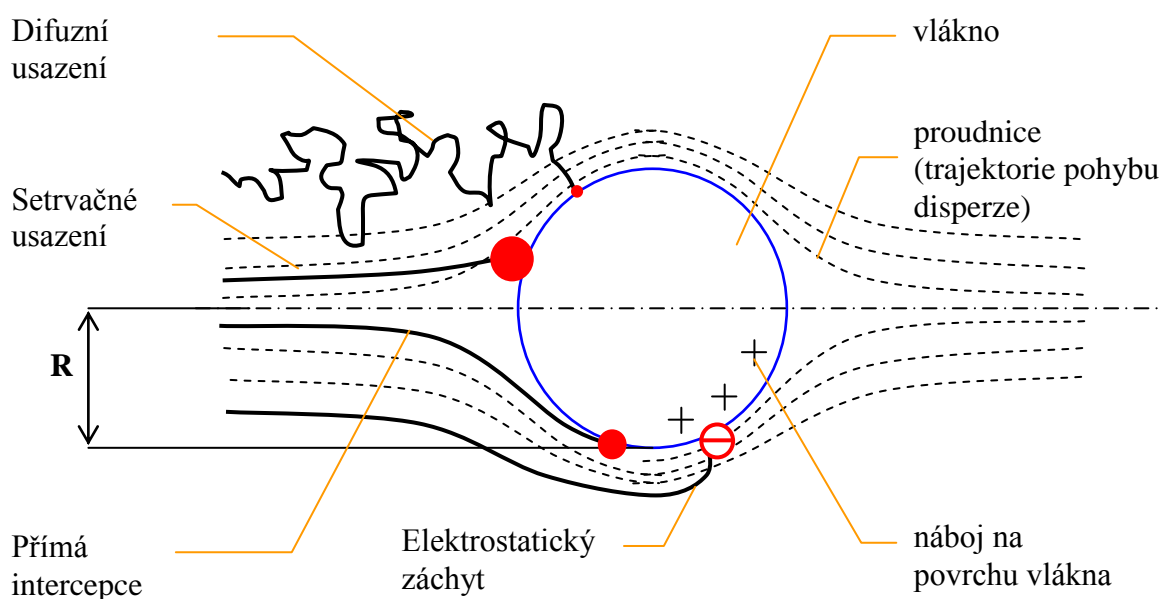
Pro získání představy vztahu mezi filtračními parametry a filtračními vlastnostmi je nutné znát mechanismy zachytu částic na povrchu vlákna. Z hlediska mechanismů můžeme filtraci dělit na plošnou a hloubkovou (viz. obr. 3).



Obr. 3 Schéma plošné a hloubkové filtrace. Vlákná filtru jsou vyjádřena jako válce orientované kolmo ke směru toku filtrované disperze.[4]

V případě filtrace plošné se uplatňuje mechanismus zvaný „sítový jev“, který je velmi jednoduchý. Částice jsou zachytávány na povrchu filtru a vytvářejí tzv. filtrační koláč (důležité zejména pro čistitelné filtry). Filtrem je mechanicky zachycena každá částice větší než prostor mezi vlákny. Velikost zachycených částic proto závisí na velikosti pórů textile. Tento mechanismus je důležitý zejména pro kapalinovou filtraci a tedy i pro filtraci oleje. Hlubkovou filtraci charakterizuje skutečnost, že velikost zachytávaných částic je řádově menší než velikost prostorů mezi vlákny. Částice různé velikosti se zachycují uvnitř filtru. Zde se uplatňuje více filtračních mechanismů najednou.

Mezi filtrační mechanismy hloubkové filtrace patří přímý záchyt, setrvačné usazení, difúzní usazení a elektrostatické usazení. Jejich schematické vyjádření popisuje takový model, jakým se částice přibližuje k povrchu vlákna. Platí předpoklad, že po kontaktu s vláknem je částice zachycena pomocí Van der Waalsových sil, elektrostatických sil a sil vyvolaných povrchovým napětím (viz. obr. 4).



Obr. 4 Schematické vyjádření filtračních mechanismů hloubkové filtrace. Vláknو filtru je vyjádřeno jako válec a je orientované kolmo ke směru toku filtrované disperze.[4]

Princip mechanismu přímého záchytu vychází z představy částic pohybujících se shodně s tokem disperzního prostředí (viz. obr. 4). Částice je zachycena, jakmile se přiblíží k povrchu vlákna na vzdálenost rovnou jejímu poloměru.

Při setrvačném usazení částice charakterizované velkou rychlostí a hmotností nesledují zakřivení proudnic a podobny projektilům narážejí na povrch vláken.

Význam difuzního usazení roste s klesající rychlostí proudění filtrované disperze. Malé částice v důsledku Brownova pohybu nesledují zakřivení proudnic a difundují k povrchu vláken.

Při elektrostatickém usazení v důsledku působení přitažlivých sil daných nábojem na povrchu vlákna a zachytávané částice je trajektorie pohybu částice zakřivena směrem k vláknu.[4]

Pro filtraci oleje lze usuzovat vliv přímého zachytu a vzhledem k malé rychlosti proudění i částečně zachytu difuzního. Ostatní mechanismy (setrvačný, elektrostatický) lze zanedbat.

2.3 Filtrační parametry

Filtrační parametry jsou vstupní proměnné, které určují průběh procesu filtrace a tím i výsledné filtrační vlastnosti.[5] Hlavní parametry filtrace lze rozdělit do tří základních skupin na parametry filtračního materiálu, parametry filtrovaných částic a parametry filtračního procesu.

2.3.1 Parametry filtračního materiálu

a) *Plocha filtru*

Plocha filtru má značný vliv na výsledné filtrační vlastnosti. Zvýšení filtrační plochy snižuje tlakový spád, zvyšuje životnost filtru a má i vliv na efektivitu filtru. Vztah mezi filtrační plochou a tlakovým spádem vhodně vyjadřuje jednoduchá D'Arcyho rovnice:

$$Q = \frac{A \cdot k \cdot \Delta p}{h \cdot \eta} \quad (1),$$

kde Q je průtok [m^3/sec], Δp je tlakový spád [Pa], A je plocha filtru [m^2], h je tloušťka filtru [m], η je dynamická viskozita [Pa.sec] a k je koeficient propustnosti filtru [m^2].[6]

b) *Tloušťka filtru*

Tloušťka filtru roste se zvyšováním počtu vrstev, tedy zvyšováním plošné hmotnosti. Tím se zvyšuje efektivita zachytu částic, nicméně s přibývajícím tloušťkou se její vliv na zlepšení filtrace zmenšuje.

c) *Plošná a objemová hmotnost filtru*

Jde o velmi jednoduchý způsob zvýšení filtrační účinnosti, který je zároveň provázen růstem tlakového spádu. Vliv zvýšení zaplnění filtru na jeho tlakový spád je popsán mnoha autory. Důležitá je hodnota zaplnění také pro jednotlivé teorie filtrace (často se užívá předpoklad velmi malého zaplnění).[4]

d) *Stejnomořnost materiálu*

Hmotová stejnoměrnost je pro filtrační proces nejdůležitější parametr, jelikož ho výrazně ovlivňuje. Tvar proudění filtrovaného média je určován minimalizací odporové síly, která vzniká protékáním viskózního média porézním prostředím. Proto v místě s lokálně nižším zaplněním projde v čase větší množství částic než v místě, kde je zaplnění lokálně vyšší. Velké množství problémů s komerčně vyráběnými filtry plyne právě ze zhoršení jejich hmotové stejnoměrnosti.[4]

e) *Materiál a jeho parametry*

Mezi parametry materiálu řadíme povrchovou interakci s částicemi, elektrické vlastnosti, odolnost vůči negativním vlivům apod. Povrchová interakce mezi vlákenným materiálem a filtrovanou částicí určuje míru pevnosti zachycení a udržení částice, která se dostala do těsné blízkosti povrchu vlákna, kde je držena pomocí Van der Waalsových sil, elektrostatických sil, případně povrchového napětí. Elektrické vlastnosti filtračního materiálu využívají svého elektrostatického pole pro zachyt filtrovaných částic. Využívají se také pro antistatické filtry, které se používají v prostorách s nebezpečím požáru či výbuchu. Mezi vnější vlivy, které negativně ovlivňují vlákenný materiál filtru, řadíme vlivy chemické (působení kyselin, zásad, oxidačních činidel, vlhkosti apod.) a fyzikální (především působení tepelné energie a záření). Tyto vlivy mohou vlákenný materiál zničit nebo snížit jeho mechanické vlastnosti tak, že dojde k protržení filtru.[4]

f) *Parametry vláken*

Do parametrů vláken zahrnujeme jejich průměr a tvar průřezu, které určují velikost specifického povrchu vlákna vyjádřeného v m^2/g . Dále preparaci, která má vliv na interakci mezi zachytávanou částicí a povrchem vlákna, tedy na schopnost zachytit a udržet částici dopadenou na povrch vlákna. Pro antibakteriální filtry se používá preparace hubící bakterie.

Také sem můžeme zahrnout mechanické charakteristiky, které jsou důležité u silně namáhaných filtrů.[4]

g) *Struktura filtru*

Z hlediska struktury je důležitá orientace vláken v prostoru, gradient hustoty, geometrická stabilita apod. Gradient hustoty vlákenného materiálu vyjadřuje lokální změnu jeho zaplnění, které je definováno jako podíl objemu vláken v prostoru tvořeném vlákny a vzduchem. Umožňuje výrazně zvýšit životnost filtrační soustavy. Orientace vláken a způsob jejich propojení má vliv na geometrickou stabilitu filtru a tím na schopnosti filtrovat a udržet již zachycené částice. Vlivem proudění viskózního média je na vlákna vyvíjen tlak, který může způsobit jejich posuv a tím i změnu rychlostního pole uvnitř filtru a také uvolnění již zachycených částic.[4]

2.3.2 Parametry filtrovaných částic

a) *Velikost částic disperzního podílu*

Velikost zachytávaných částic určuje typ použitého filtru a parametry filtračního procesu. Na obr. 2 jsou uvedeny příklady velikostí běžných filtrovaných částic a typy filtrace.

b) *Distribuce velikosti částic disperzního podílu* – je dána distribuční křivkou. Pro stanovení distribuce velikosti částic existuje celá řada metod.

c) *Koncentrace částic* – určuje životnost filtru. S přibývajícím koncentrací částic ve vzduchu se zvyšuje i míra růstu tlakového spádu a efektivity.

d) *Tvar a povrch částic*

Částice lze podle tvaru třídit na izometrické (tvar aproximovatelný koulí), destičkovité a vláknité.[7] Ve vlákenné soustavě se snadněji zachytí částice složitějšího tvaru, než-li kulovitěho. Lépe se mechanicky zaklesnou a mají větší specifický povrch.

e) *Objemová hmotnost částice* – závisí na mechanismu filtrace. S rostoucí objemovou hmotností roste efektivita setrvačného a gravitačního usazení, nemění se efektivita přímého zachytu a klesá efektivita difuzního a elektrostatického zachytu. Samotný filtrační proces není nikdy dán pouze jedním filtračním mechanismem. Při velkých filtračních rychlostech s růstem objemové hmotnosti částic roste i efektivita zachytu.[4]

f) *Elektrické vlastnosti*

S rostoucí velikostí elektrického náboje částic roste i efektivita filtrace.

2.3.3 Parametry procesu filtrace

a) *Náletová rychlost částic na filtr* – rychlost na místě dopadu částic.

S rostoucí rychlostí toku média filtrem roste význam mechanismu setrvačného usazení, klesá význam mechanismu difuzního zachytu, elektrostatického zachytu a setrvačného usazení. Hodnota přímého zachytu se nemění. Pro velké částice s velkou měrnou hmotností je vhodnější větší filtrační rychlost, zatímco pro malé částice (průměry řádově mikrometry a menší) efektivita jejich zachytu s rostoucí rychlostí filtrace klesá.

b) *Viskozita protékajícího média* – větší význam u kapalinové filtrace.

S rostoucí viskozitou vzduchu roste i tlakový spád filtru a zhoršuje se jeho odlučivost. Viskozita roste mimo jiné i s teplotou. Tento fakt je velmi důležitý při filtraci oleje, neboť zde dochází k velkému rozpětí provozních teplot a tedy i viskozity.

c) *Teplota, tlak a vlhkost*

Teplota má vliv na použití materiálu filtru vzhledem k jeho odolnosti vůči teple, záření a působení chemikálií, na změnu viskozity prostředí a tím i tlakového spádu a efektivitu, na mechanismus zachytu difuzí a negativní vliv na stabilitu náboje na povrchu vláken elektrizovaných filtrů. Vlhkost prostředí má také vliv na použití materiálu filtru a na stabilitu náboje na povrchu vláken. Tlak vzdušného prostředí před filtrem má většinou velikost atmosférického tlaku.

2.4 Filtrační vlastnosti

Filtrační vlastnosti se v průběhu procesu filtrace mění v důsledku zaplňování mezivláknenných prostor částicemi. Mezi hlavní filtrační vlastnosti patří:

a) Efektivita

Efektivita, neboli odlučivost je dána vztahem:

$$E = \left(1 - \frac{G_1}{G_2}\right) \cdot 100 \quad (\%) \quad (2),$$

kde G_1 je množství částic nezachycených filtrem [g], G_2 celkové množství částic nalétávající na filtr [g] a podíl G_1/G_2 je značen jako průnik P.[4] Jedná se o množství zachycených částic vztažené na celkové množství částic nalétávající na filtr. Čím je efektivita vyšší, tím je filtr účinnější.

Efektivita se mění v průběhu procesu filtrace v důsledku zanášení filtru částicemi. Což je způsobeno tím, že částice, které jsou zachycené na povrchu vlákna, se samy stávají filtrem a zvyšují tak jeho činnou plochu.

b) Tlakový spád

Tlakový spád, jež bývá někdy označován jako tlaková ztráta, určuje rovnice:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (3),$$

kde p_1 a p_2 jsou tlaky filtrovaného média před a za filtrem [Pa]. Vyjadřuje odpor vůči toku vzduchu skrz filtr. Cílem je najít filtr s velkou efektivitou a nízkým tlakovým spádem.

Tlakový spád se mění v průběhu procesu filtrace v důsledku zanášení filtru zachycenými částicemi. Jeho růstem je obvykle dána životnost filtru – buď naroste do hodnoty, kdy již není možné požadovaný objem disperzního prostředí transportovat skrz filtr, nebo dojde k poškození filtru, případně poklesu efektivit.

c) *Životnost filtru*

Životnost filtru je dána dobou, kdy je třeba filtr vyměnit. Je určena rychlostí zanášení filtru a koncentrací částic před filtrem. Z hlediska životnosti známe filtry jednorázové a filtry s čištěním. Definice životnosti pomocí jímavosti:

$$J = E_{\text{stř}} \cdot m \quad (4),$$

kde J je jímavost filtru [g] , $E_{\text{stř}}$ je střední hodnota efektivity [%] a m je množství prachu naneseného na filtr [g] do okamžiku překročení mezního tlakového spádu (450 Pa).[4]

d) *Odolnost vůči vnějším vlivům*

Na filtr působí vlivy chemické, mechanické, vliv teploty a kombinace těchto uvedených vlivů.

e) *Další vlastnosti související s filtrací*

- Prodyšnost

Vyjadřuje množství tekutiny, které projde skrz 1m² filtru za 1 minutu při definovaném tlakovém spádu, nejčastěji při 196 Pa. Udávané jednotky jsou l/m²/min.

- Pórovitost

Pórovitostí lze vyjádřit velikost póru určenou obvykle střední, či maximální hodnotou, nebo distribucí velikostí. Nevýhodou hodnocení pórovitosti je problematická definice póru. Pro uspořádané vlákenné systémy s velkým zaplněním lze póry aproximovat válcovými kanály a celý vlákenný systém popsat pomocí Poiseuilleova zákona.[9]

- Odolnost vůči bakteriím

Bakterie zachyceny filtrem jsou stále aktivní a mohou časem prorůstat jeho strukturou a následně být uvolněny do čištěného prostoru. Při filtraci bakterií je nutné tedy řešit nejen jejich záchyt, ale i schopnost filtru je zničit, případně zastavit jejich růst.[8]

2.5 Kapalinová filtrace

Hlavní rozdíl mezi vzduchovou a kapalinovou filtrací je ve viskozitě disperzního prostředí a tím i v uplatněných filtračních mechanismech.

Na rozdíl od vzduchové filtrace, kde mohou být uplatněny oba základní způsoby filtrace v závislosti na filtračních parametrech (zejména velikost částic a rychlost jejich pohybu), u kapalinové se více uplatňuje plošný způsob filtrace, zejména síťový efekt. Ostatní filtrační mechanismy jsou potlačeny z důvodu velkých sil daných proudící kapalinou. K jejich uplatnění dochází při snížení rychlosti toku nebo v místech s turbulencí.[1] Filtrace oleje je příkladem pomalého průtoku (cca 0,1 l/min).

2.5.1 Aplikace

- Potravinářství – filtrace: voda, víno, pivo, alkoholické a nealkoholické nápoje, solné lázně v mlékárenství, medovina a vosk, ocet apod.
- Chemie, kosmetika – filtrace: voda, pryskyřice, laky, lepidla, rozpouštědla, louhy, kyseliny, galvanické lázně, fotografické emulze, parfémy, kosmetické oleje apod.
- Farmacie – filtrace: voda, enzymy, séra, extrakty, deriváty, vakcíny, infuze
- Petrochemie – filtrace: voda, bionafta, ropné produkty
- Strojírenský průmysl – filtrace: voda, hydraulické a obráběcí oleje, honovací a finišovací oleje, chladicí emulze a řezné kapaliny[12]
- Automobilový průmysl – filtrace: palivo, olej, hydraulika, brzdová kapalina, speciální filtry pro hybridní motory apod.[11]

2.6 Filtrace oleje v automobilovém průmyslu

2.6.1 Historie oleje

V třicátých letech minulého století se používaly vysoce viskózní oleje, do kterých se přidával řepkový nebo ricinový olej pro větší přilnavost. Problém často nastal v zimních měsících při startování, kdy se musel motor často předehtřívát. Vývoj olejů i motorů přináší období druhé světové války. Připravují se přesné specifikace pro oleje, a to v USA pro viskozitu třídy SAE a pro výkonové hodnocení API. Jedná se převážně o čisté ropné výrobky, které se postupně vylepšují jak technologií výroby, tak zaváděním různých přísad. Postupně se přechází od sezónních olejů (letní a zimní) na celoroční. Se stoupajícími nároky na motory vznikají oleje polosyntetické a v neposlední řadě syntetické oleje.

Evropská klasifikace vzniká v devadesátých letech a oleje jsou dnes hodnoceny podle ACEA. Kromě výše uvedených klasifikací mají jednotliví výrobci automobilů své samostatné klasifikace, které v jednotlivých motorech musíme dodržovat. V České republice se dnes u osobních automobilů, hlavně díky složení vozového parku, kde jsou bohatě zastoupeny značky Škoda a Volkswagen, setkáváme nejčastěji s klasifikací (normami) VW.

V současné době je snaha udržet motory co nejdéle v provozu. Cílem výrobců automobilů je systematicky prodlužovat servisní služby u všech typů automobilů. To klade nové požadavky na celý komplex opatření, které je nutné zajistit. Prodloužená servisní činnost je komplexní činnost a vyžaduje řadu nových prvků. Jedná se předně o:

- nové koncepce motoru, kde je vyžadována přesnost ve výrobě
- zajištění dokonalé čistoty celého motoru
- nové typy filtrů oleje i vzduchu
- nová koncepce motorových a převodových olejů [13]

2.6.2 Druhy olejů

Oleje rozdělujeme na motorové, převodové, hydraulické, proplachovací, tlumičové. Nás budou nejvíce zajímat oleje motorové. Převodový olej se používá do převodovek, kde nejsou vysoké teploty (většinou do 60° C), ani nepůsobí spaliny či nespálené palivo. Jeho viskozita je výrazně vyšší než viskozita motorového oleje. Hydraulický olej se používá do posilovačů řízení, proplachovací oleje dnes ztrácejí význam a tlumičový olej většinou nepoužijeme, při poruše tlumičů je vyměníme, nebo dáme do odborné opravy na repasi (pokud olej vyteče, je vadná ucpávka a nalití nového oleje skončí opět jeho vytečením).[17]

2.6.3 Motorový olej a jeho viskozita

Jeho funkcí je mazání všech třecích dvojic v motoru, odvádění tepla (olej odvádí asi 10% vznikajícího tepla v motoru), dotěšňování pístů a pístních kroužků, odplavování nečistot všeho druhu a konzervace vnitřních částí motoru při jeho odstavení z provozu.

Motorové oleje se vyrábějí z ropy destilací (vznikne tzv. minerální olej), nebo se vyrábějí „složením“ jednotlivých komponentů, které musí olej obsahovat. Taková výroba syntetickou cestou má výhodu v tom, že olej obsahuje jen ty složky, které jsou nezbytně nutné a vhodné. Ostatní, které tam být nemusí, ale není je možné klasickou cestou odstranit,

a které zhoršují vlastnosti oleje, tam tedy nejsou, oleje mají výrazně lepší parametry, ale také výrazně vyšší cenu (3 – 5x). Na motorový olej jsou kladeny protichůdné nároky. Kromě toho, že má motor mazat za všech teplot, a to jak kluzná ložiska, tak různá ložiska valivá, ozubené převody, řetězy, vačky atd., musí odvádět teplo z horkých míst motoru, kde není možné chladiť kapalinou (písty, kroužky, kluzná uložení), dotěšňovat píst ve válci, konzervovat motor při delším odstavení z provozu, při spalování vytvářet co nejmenší množství popela a toto vše musí zvládat dlouhé tisíce kilometrů.

Do surového minerálního oleje se přidávají inhibitory a detergenty (zkráceně aditiva). Inhibitory chrání olej před účinky kyslíku a mazané plochy proti otěru a korozi, detergenty udržují v disperzi nerozpustné složky v oleji a neutralizují kyselé spaliny a kyselé oxidační zplodiny. Dále se olej upravuje z hlediska viskozity, její hodnota by se měla s teplotou měnit co nejméně. Neupravený olej mění viskozitu ve velmi širokém rozsahu podle teploty, čím je teplota nižší, tím je viskozita větší (olej houstne a špatně teče), se zvyšující se teplotou olej řídne, až ztratí mazací schopnosti. Úprava se provádí technologickým postupem při výrobě oleje a speciálními přísadami.[17]

Viskozita – důležitý, ale velmi často jediný údaj, který motoristu zajímá při koupi oleje bez ohledu na výkonnostní klasifikaci. Viskozita je míra vnitřního tření kapaliny a je způsobena odporem, který kladou jednotlivé molekuly kapaliny vzájemnému pohybu (každá kapalina má svoji velikost viskozity). Jednotkou této kinematické viskozity (nebo také vazkosti) je mm^2/s . Měří se průtokem kapaliny kapilárou, přičemž tíha působící průtok kapaliny je dána její hustotou. Násobením kinematické viskozity hustotou kapaliny získáme dynamickou viskozitu, vyjádřenou v Pa.s. Pro nás je důležitý viskozitní index, vyjadřující jedním číslem závislost viskozity na teplotě. Čím je toto číslo vyšší, tím je menší teplotní gradient viskozity, průběh teplotně viskozitní křivky je plošší a viskozita se mění jen nepatrně. Takový olej je pro motor z hlediska viskozity nejvhodnější.[17]

2.6.4 Nečistoty a saze v motorovém oleji

Nečistoty pocházejí z několika zdrojů a během provozu se hromadí v motorovém oleji. Pod tímto pojmem se rozumí jednak mechanické nečistoty (prach, otěr, saze) a jednak produkty chemické degradace samotného oleje. Nadměrný obsah nečistot v oleji vede ke zvýšenému opotřebením třecích povrchů, k tvorbě úsad a kalů hromadících se v klikové skříni a celém olejovém systému a v konečném důsledku i k ucpání olejového filtru a k poruchám dodávky oleje do systému.

Nejčastějším zdrojem cizích částic v motorovém oleji je nasávaný vzduch, který nikdy není absolutně čistý, ale spolu s ním se nasávají do spalovacího traktu i prachové částice. Velké a střední prachové částice jsou zachyceny na vzduchovém filtru, menší se dostávají do spalovacího prostoru a později jsou z prostoru válce motoru spláchnuty do motorového oleje. Dalším zdrojem je palivo, se kterým přicházejí i prachové částice a různá vlákna z filtrů, jimiž palivo prochází během distribuce z rafinerie až k výdejním stojanům. Hromadění těchto nečistot na palivovém filtru v automobilu může vést až k jeho ucpání a destrukci. Palivo potom není filtrované vůbec a nečistoty končí ve spalovacím prostoru a poté i v oleji. Na pravidelnou výměnu palivových filtrů se bohužel často zapomíná. Otěrové částice kovů i samotný motorový olej, ve kterém se vlivem oxidačního a termického namáhání tvoří nerozpustné částice (karbonové povlaky a kaly), jsou dalšími nečistotami v oleji. Kvalitní olejové filtry mohou z oleje odstranit částice přibližně nad 10 mikrometrů. Saze patří k mechanickým nečistotám, které jsou vytvářeny až v samotném spalovacím prostoru při spalování nafty. Jsou tvořeny téměř čistým uhlíkem a jsou velmi tvrdé s ostrými hranami. Jejich rozměr není příliš velký. Velikost částic sazí je přibližně setina mikrometru, díky aglomeraci a shlukování částic se však jejich velikost zvětšuje na několik setin až jednu desetinu mikrometru. Částice kolem desetiny mikrometru jsou mnohem menší, než je velikost olejového mazacího filmu či velikost pórů olejového filtru. Saze se v motorovém oleji hromadí od počátku nasazení oleje v motoru. Už malé množství sazí v oleji, většinou už i saze ze zbytku staré náplně, způsobí zčernání oleje. Problémy se sazezi nastávají, pokud je jejich množství v oleji již velmi vysoké. Udává se limitní koncentrace sazí přibližně 3 hmotnostní procenta.[23]

2.6.5 Vliv sazí na viskozitu

Nadměrný obsah sazí v oleji způsobuje růst viskozity oleje. Příliš vysoká koncentrace sazí může mít také za důsledek vyčerpání disperzančních přísad, koagulaci sazí do větších shluků a postupné ucpávání olejového filtru. Obsah sazí také byl jednou z příčin toho, že vznětové motory osobních automobilů měly kratší interval výměny motorového oleje oproti zážehovým motorům. Teprve růst kvality základových olejů a disperzantů způsobil, že výměnné intervaly olejů vznětových motorů mohly být prodlouženy na úroveň zážehových motorů či ještě více.

Závažným důsledkem vysokého obsahu sazí a dalších mechanických nečistot v oleji je zvýšené opotřebení motoru. I když jsou částice sazí velmi malé, ve větší koncentraci působí obdobně jako jemná brusná pasta a také při čerpání takového oleje dochází díky proudění částic sazí k jejich nárazům na kovové povrchy a k abrazivnímu opotřebení.[23]

2.7 Olejové filtry

Kromě mazání mají olej a olejový filtr také následující funkce:

- **chlazení:** vstřebávají a odvádějí teplo z místa tření a zážehu motoru
- **čištění:** olejem jsou zachyceny a následně odvedeny do filtru znečišťující částice vznikající při tření. Olejový filtr je zachytí, stejně jako jakékoliv zbytky vznikající při zážehu motoru.

Díky olejovému filtru jsou z oleje odstraněny částice nečistot, které by jinak společně s olejem tvořily brusnou pastu způsobující opotřebení motoru.[24]

2.7.1 Rozdělení olejových filtrů

1. Podle velikosti zachycovaných částic:

- a) *hrubé* - zachycují částice větší jak 40 μm
- b) *jemné* – zachycují částice větší jak 1 až 2 μm

2. Podle zapojení v mazacím systému:

- a) *plnoprůtokové*
- b) *obtokové* (by-pass)

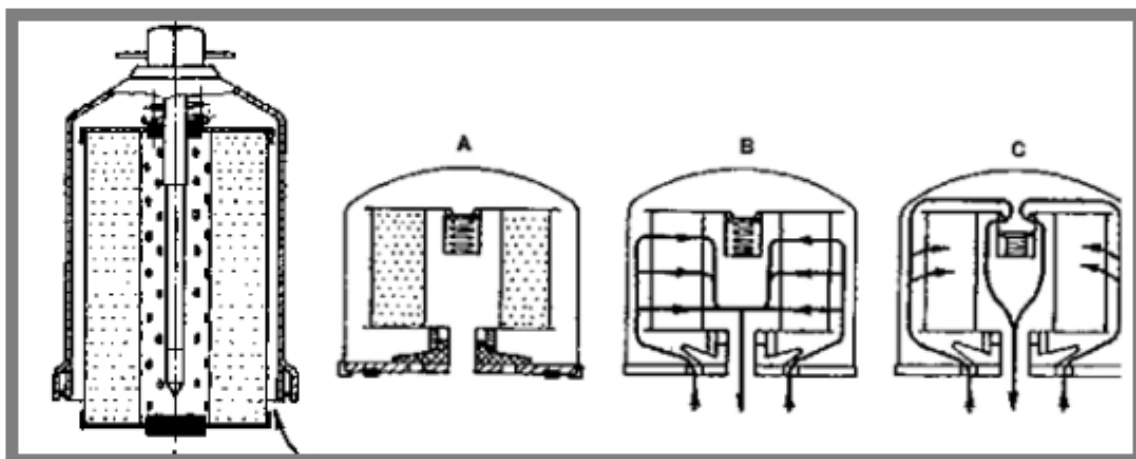
Původní filtrace oleje byla často řešena jako obtoková, tzn., že se filtr umístil do obtokového kanálu, kudy procházelo zhruba 20% čerpaného oleje (zbylých 80% šlo přímo do olejového okruhu). V jeden okamžik byla tedy vyčištěna jen část oleje, celý objem byl přečištěn postupně. Výhodou obtokového filtru byla jeho vyšší účinnost filtrace, olej byl čištěn pomaleji a intenzivněji. Ucpaný filtr se vyřadil z činnosti a k mazaným místům proudil nevyčištěný olej. Obtokové čističe byly konstruovány nejčastěji s výměnnou vložkou (papírovou, případně textilní) a tak, aby byl zajištěn co nejmenší průtočný odpor (u nových vložek je tlakový spád na filtru v rozmezí 0,02 – 0,03 MPa) při co nejlepší filtraci (uvádí se filtrace částic až do 10 μm).[18] Obtoková filtrace byla používána proto, že filtr byl výrobně jednoduchý, nebyl namáhán plným tlakem oleje. Olej byl levný a tak nikomu nevadilo každých 5 000 km olej vyměnit. U mnoha vozidel se používalo několikastupňové čištění, kdy byly za sebou umísťovány filtry s kovovými lamelami, které postupně zachytávaly

mechanické částice podle jejich velikosti, na konci řady byl obtokový filtr s papírovou vložkou. Lamelové filtry měly páčku, kterou se občas zakývalo, a tím se lamely pročistily, usazené částice se shromažďovaly ve spodní záchytné komoře filtru, jednou za čas se komora odkalila. Obtoková filtrace měla na druhé straně jedno pozitivum, olej se často nestačil znehodnotit nevhodným provozem a byl nahrazen novou náplní dříve, než ztratil většinu svých vlastností. Z tohoto důvodu se často ani neudávalo nějaké zkracování výměnných lhůt.[17]

Se zvyšujícími se nároky na výkon a hlavně životnost motorů a s nástupem nové řady aditivovaných olejů bylo nutné přepracovat soustavu filtrace, požadavkem bylo udržet olej co nejvíce čistý, aby se do kluzných ložisek nedostávaly pevné částice, které poškozují povrch čepů, vaček atd. Plnoprůtokový filtr musel snášet plný tlak oleje a pětinasobný průtok oleje proti obtokovému filtru, jeho konstrukce a použité materiály jsou odlišné, odlišné je i uspořádání olejového okruhu (bez úpravy není možné takový filtr namontovat místo filtru obtokového). Plnoprůtokové filtry jsou konstruovány převážně jako nerozebíratelné, těleso čističe a vložky je navzájem spojené. Z důvodu nebezpečí poruchy mazání při totálním ucpání filtru je vybaven pojistným ventilem, který propustí olej obtokem okolo vložky - lépe nefiltrovaný než žádný olej. Méně časté jsou plnoprůtokové filtry skříňové, které mají vyměnitelnou vložku.

Funkci obtokového a plnoprůtokového čističe znázorňuje obr. 5, u obtokového také jeho skladbu a tudíž i jeho montáž při výměně. Rozdíl mezi obtokovým a plnoprůtokovým filtrem je kromě konstrukce ve velikosti zachycovaných částic, plnoprůtokový je o něco hrubší a nedokáže zachytit velmi malé částice, obtokový filtr je jemnější a tudíž olej na výstupu z filtru je čistější. Na základě tohoto rozdílu firma Tecnocar vyvinula kombinovaný filtr, který v jednom pouzdře sdružuje filtr plnoprůtokový i obtokový, montuje se normálně na místo plnoprůtokového filtru. Tento filtr je zvláště vhodný pro vozidla pracující v rozvážkovém režimu, ovšem použít ho můžeme na všechna vozidla s plnoprůtokovou filtrací.

Kvalitní filtrace nezanedbatelně ovlivňuje životnost olejové náplně a životnost motoru.[17]



Obr. 5 Obtokový a plnoprůtokový čistič oleje, A- řez obtokovým filtrem, B- normální průtok oleje, C- průtok oleje při zvýšeném odporu filtrační vložky.[16]

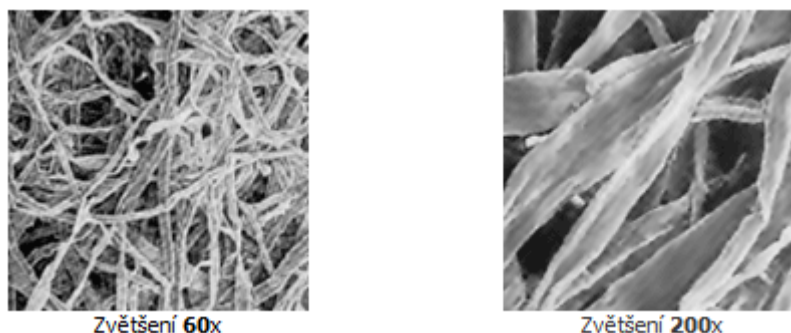
3. Podle konstrukčního provedení:

- a) *štěrbinové* – rozměr zachycovaných částic je určen velikostí štěrbin mezi filtračními elementy
- b) *objemové* – částice jsou zachycovány v objemu materiálu filtrační vložky, tvořené například plstěným válečkem
- c) *s papírovou filtrační vložkou* – jsou v současné době používány výhradně, ostatní dva předešlé se již nepoužívají

2.7.2 Materiály olejových filtrů a jejich vlastnosti

Využívané filtrační materiály (médiá) se v posledních letech rychle mění. Dříve se používaly zejména ocelové vlny, drátěná síta, kovové rámy atd., později pak převážně bavlna a různé bavlněné varianty filtrů. Poté, co se rozvinulo používání jednorázových filtrů, začalo se využívat celulózových a papírových filtrů pro minimalizaci výrobních nákladů. Poslední fázi vývoje tvoří syntetické filtrační materiály, které se také využívají pro filtraci olejů. Dnes nejrozšířenější jednorázové „spin-on“ filtry využívají celulózové filtrační materiály. Vyšší efektivity filtrace lze dosáhnout využitím syntetických materiálů.[25]

K filtraci motorového oleje se standardně používá filtrační papír na bázi celulóзовého vlákna impregnovaného speciálními fenolovými nebo epoxidovými pryskyřicemi, které jej chrání před vlivem vysokých teplot a agresivních chemických látek, které se nacházejí v oleji a vznikají v důsledku jeho degradace. U moderních filtračních materiálů, zvláště těch, které jsou určeny k filtraci syntetických olejů, se používají příměsi umělých vláken nebo dokonce plně syntetické filtrační materiály jako je polyester, polypropylen atd. Je to způsobeno větším zatížením filtrační přepážky. Pro zvýšení absorpční schopnosti filtru se používají vícevrstvé materiály s různou strukturou a různými filtračními vlastnostmi u každé vrstvy. Kombinací těchto materiálů lze docílit efektu selektivního oddělování nečistot na každé vrstvě. Výsledkem toho je značné zvýšení absorpce nečistot se zachováním požadované účinnosti filtrace oleje.[26]



Obr. 9 Struktura filtračního papíru na bázi celulóзовého vlákna.[26]

2.7.3 Jednotlivé části olejového filtru

Olejový filtr je složen z více částí. Jednotlivé části jsou zobrazeny na obr. 6. Plášť filtru musí být pevný a odolný proti tlaku, proto je vyroben z kovu. Ocelová vinutá pružinka drží komponenty filtru na místě a koncové víčko s obtokovým ventilem, kde jeho pozice musí být totožná s OEM. Další částí je středová výztuž filtrační vložky, která umožňuje správný průtok oleje. Filtrační vložka je pevně uložena víčkem. Dále je na víčko aplikováno silikonové těsnění zpětného ventilu – zůstává pružné i při vysokých teplotách. Všechny tyto komponenty jsou umístěny do kovového pláště filtru a celý je uzavřen hrdlem filtru a těsněním s dlouhou životností, které zůstává dlouho pružné.[24]

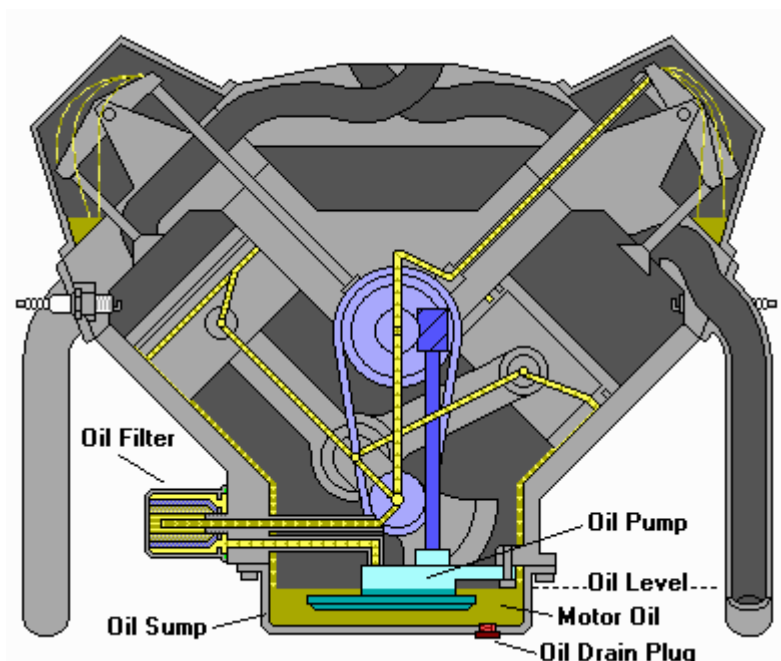


Obr. 6 Olejový filtr – rozpad, popis částí.[24]

2.7.4 Zapojení olejového filtru v motoru automobilu

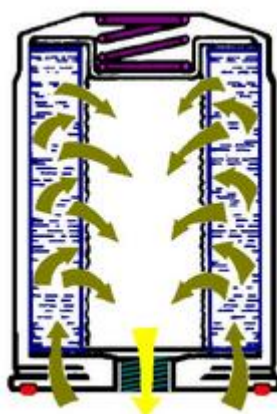
Olej za chodu motoru nepřetržitě cirkuluje motorovým systémem, prochází přes olejový filtr do motorového systému, kde maže všechny potřebné součásti motoru a vrací se zpět do olejové nádrže motoru. Celý tento proces se znovu opakuje.

Olejové filtry mají určitou dobu životnosti, a proto je potřeba po určitém uplynutí doby filtr měnit. Dle časového intervalu je doba výměny od 1 do 2 let dle typu vozidla a dle ujetých km od 15 do 50 tisíc km.[25]



Obr. 7 Schéma zapojení olejového filtru v motoru.[25]

Olej (Motor Oil) je čerpán z olejové jímky (Oil Sump) přes filtr (Oil Filter) a poté rozváděn napříč jednotlivými částmi motoru. Olej vstupuje do filtru pod tlakem přes díry na spodním kruhovém víku filtru. Znečištěný olej pak prochází filtrem, kde je očištěn od vměstků. Potom proudí dále do hlavní trubice filtru a zpět do motoru obvykle přes dutý střední sloupek filtru. Jediný spojovací komponent držící filtr k motoru a zabraňující prosakování oleje je hlavní těsnění filtru, které je vyznačeno na obr. 8 červeně.[25]



Obr. 8 Průtok oleje filtrem.[25]

2.8 Stanovení množství nečistot v oleji

Problematika nečistot v motorových olejích je velmi široká a zahrnuje velmi mnoho vlivů. Také počet různých stanovení nečistot je poměrně velký a rozmanitý. Pro hodnocení znečištění oleje je tedy vždy dobré vědět, jakou metodou a postupem byly nečistoty stanoveny a jaké nečistoty jsou ve stanovení zahrnuty.

2.8.1 Kapkový test

Nejstarší způsob odhadu množství nečistot v motorovém oleji je tzv. kapkový test. Tento test je velmi jednoduchý, spočívá ve vyhodnocení vzhledu kapky oleje na filtračním papíře (viz obr. 10). Test je poměrně spolehlivý a zkušenému pracovníkovi o oleji řekne opravdu hodně. V dnešní době je však již pro moderní motorové oleje většinou nepoužitelný. Důvodem jsou vynikající detergentní a disperzantní vlastnosti dnešních motorových olejů, které nedovolí kapce oleje na filtračním papíru vytvářet takové útvary, jaké by byly pro správné vyhodnocení potřebné.[23]



Obr. 10 Kapkový test a projevy znečištěných motorových olejů.[23]

2.8.2 Membránová filtrace

Dalším způsobem zjištění množství nečistot v oleji je filtrace oleje přes mikroporézní filtr, většinou s velikostí pórů 0,8 mikrometru (viz obr. 11). Olej je nutné předem rozpustit v rozpouštědle, aby se snížila jeho viskozita a bylo jej možné filtrovat. Použití rozpouštědla s malou rozpouštěcí silou (např. pentan či hexan) může v hodně degradovaných olejích způsobit navíc i vysrážení některých velmi polárních oxidačních produktů z oleje. Ty potom přispívají k celkovému množství nečistot v oleji. Stupeň znečištění oleje je možné vyhodnocovat jako stupeň znečištění filtru srovnáváním se stupněm znečištění standardních skvrn. Pokud analýzu provádíme pečlivě a máme k dispozici kvalitní váhy, je možné množství mechanických nečistot na filtru také zvážit a zjistit hmotnostní procenta nečistot v oleji.[23]



Obr. 11 Filtrační zařízení pro membránovou filtraci.[23]

2.8.3 Odstředování

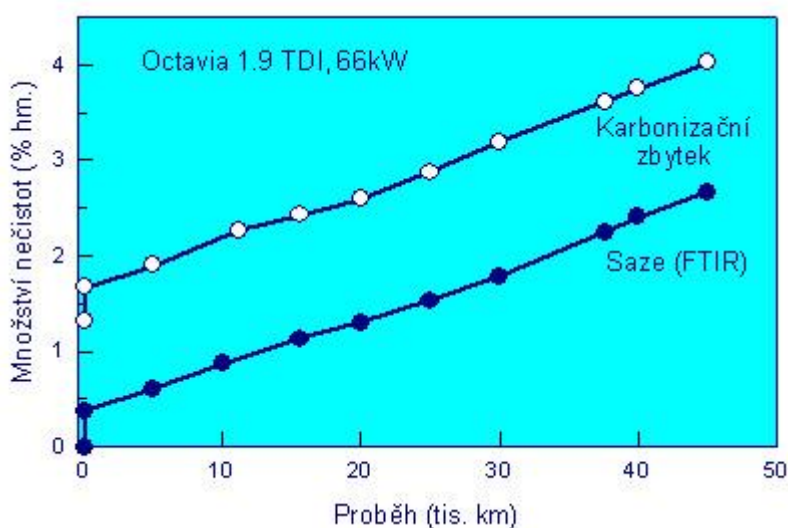
V některých případech se stanovuje množství nečistot v oleji odstředováním. Vzorek oleje je umístěn do kalibrované speciální nádoby, a ta poté do výkonné odstředivky. Při odstředování se mechanické nečistoty hromadí na dně nádoby a množství nečistot se po odstředění odečte na ryskách kalibrované nádoby. Je však třeba říci, že uvedenými postupy lze stanovit poměrně velké částice nečistot, kterých však v dnešních olejích není příliš mnoho díky používání kvalitních filtrů a také díky kvalitním detergentům a disperzantům. Ty nedovolí shlukování menších částic do větších celků. Nejčastější a nejzávažnější mechanické nečistoty - saze v olejích vznětových motorů - těmito způsoby nelze stanovit vůbec. Saze projdou většinou použitelných filtrů. Množství takto stanovených nečistot obvykle nepřevyšuje několik málo desetin procenta.[23]

2.8.4 Moderní způsoby stanovení nečistot a sazí

Pro stanovení celkových nečistot v motorových olejích včetně i těch nejmenších částíček sazí se dnes nejčastěji používá *infračervená spektroskopie*. Protože saze a další mechanické nečistoty jsou tmavé a nepropouštějí světlo, způsobují při měření infračerveného spektra zvýšení tzv. základní linie, které se měří při 2000 cm^{-1} . Toto zvýšení základní linie je tím větší, čím vyšší je obsah sazí a dalších nečistot. Pomocí vhodné kalibrace je také možné z nárůstu intenzity základní linie určit i hmotnostní procenta sazí v motorovém oleji (viz obr. 12).

Dobrým ukazatelem znečištění motorových olejů je také stanovení *karbonizačního zbytku*, který se stanovuje zahřátím vzorku oleje na teplotu 500 °C v inertní atmosféře dusíku. U olejů vznětových motorů je nárůst množství karbonizačního zbytku způsoben především sazemi, příp. i jinými nečistotami. U olejů ze zážehových motorů způsobují nárůst karbonizačního zbytku hlavně produkty oxidační a termické degradace oleje. Množství prachových nečistot z nasávaného vzduchu se běžně stanovuje *analýzou množství křemíku* v oleji. Křemík se stanovuje spektrometricky současně s otěrovými kovy, podle jejichž množství se hodnotí intenzita opotřebování motoru.

Znečištění oleje je také možné hodnotit *ferrografickou analýzou*. Tou se hodnotí především otěrové částice železa, metoda je však částečně citlivá i na další nečistoty.[23]



Obr. 12 Množství nečistot v provozovaném motorovém oleji.[23]

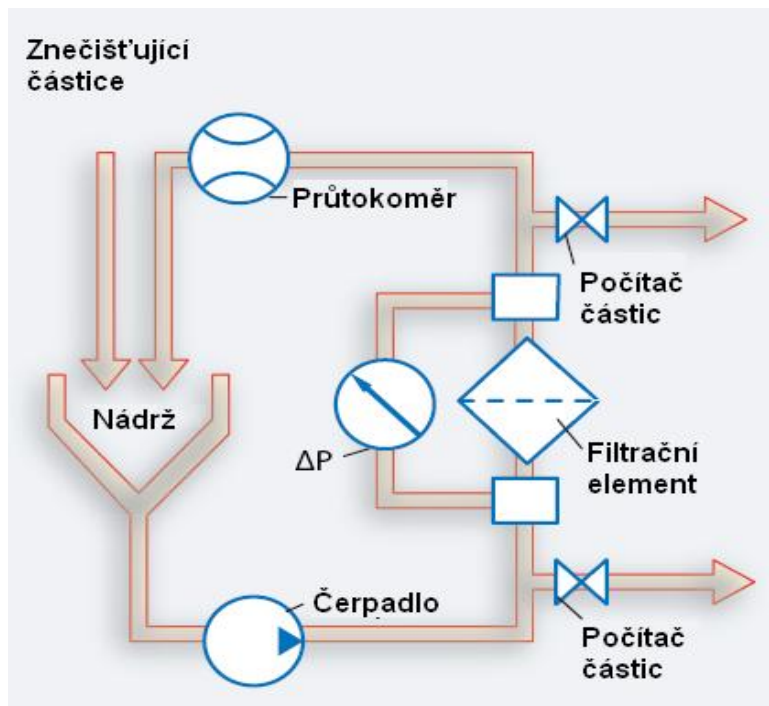
2.9 Hodnocení filtračních materiálů

2.9.1 Multipass Test – ISO 16889

Výrobci filtrů využívají metodu na vyhodnocování výkonnosti filtračních vložek „Multipass test“. Při testu, jehož schéma je znázorněno na obr. 13, cirkuluje kapalina v obvodu za přesně řízených a sledovaných podmínek. Tlaková difference na filtračním prvku je trvale zaznamenávána při stále stejném množství a složení znečišťujícího materiálu dodávaného do proudu před filtračním prvkem. Zároveň online laserové měřiče znečištění kapaliny před a za testovaným filtrem monitorují aktuální počet a velikost nečistot. Výkonový ukazatel vlastností filtračního prvku – koeficient β je určován pro několik rozměrů znečišťujícího materiálu.

Výsledkem Multipass testu jsou tři důležité výkonové charakteristiky:

- Kapacita zadrženého znečišťujícího materiálu
- Konečná tlaková diference na testovaném filtračním prvku
- Účinnost filtrace



Obr. 13 Schéma Multipass testu.[29]

$$\beta_x = \frac{\text{suma částic před prvkem}}{\text{suma částic za prvkem}}$$

$$\text{účinnost}_x = \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) 100$$

Částice před filtr. prvkem	Částice za filtr. prvkem	Poměr Beta (x)	Účinnost (x)
50.000	$\frac{100.000}{50.000}$	= 2	50,0%
5.000	$\frac{100.000}{5.000}$	= 20	95,0%
1.333	$\frac{100.000}{1.333}$	= 75	98,7%
1.000	$\frac{100.000}{1.000}$	= 100	99,0%
500	$\frac{100.000}{500}$	= 200	99,5%
100	$\frac{100.000}{100}$	= 1000	99,9%

Tab. 1 Účinnost filtru v závislosti na množství nečistot před a za filtrem.[29]

Poměr Beta (β) je mírou účinnosti zadržení nečistot testovaným filtračním prvkem. Proto je to výkonnostní poměr. Za absolutní filtrační schopnost je požadovaná hodnota $\beta_x = 200$. [29]

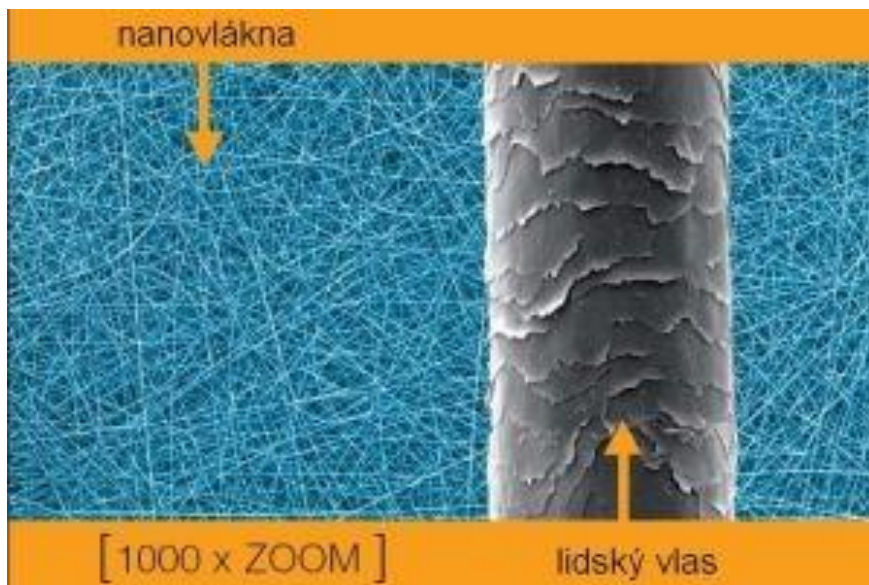
2.9.2 Dynamická účinnost filtrů – DFE (Dynamic Filter Efficiency)

Stále se zvyšující nároky na čistotu hydraulických kapalin a mazacích olejů vedou k neustálému zvyšování výkonových parametrů filtračních prvků. Posledním trendem ve vývoji a testování filtrů je hodnocení jejich účinnosti metodou DFE, kdy se stanovuje dynamická účinnost filtrů (Dynamic Filter Efficiency). [30] Tato metoda vznikla na základě požadavků výrobců hydraulických prvků – servoventilů a přibližuje se skutečným provozním podmínkám. Hlavní rozdíl mezi Multipass testem a DFE je, že se rychlost protékající kapaliny filtrem mění. U Multipass testu je průtok kapaliny konstantní 114 l/min. U metody DFE jsou dva průtoky, vyšší průtok je stejný 114 l/min a druhý je nižší (tzv. odlehčení) 57 l/min. U metody DFE bylo zjištěno, že se účinnost filtrů mění při změně průtoku kapaliny. Výraznější změna je při zvýšení průtoku. [29]

2.10 Výroba nanovláken

2.10.1 Nanovlákná

Nanovlákná jsou speciálně vyráběná vlákna o průměru menším než $1\mu\text{m} = 1000\text{ nm}$ ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$). Bývají označovány za materiály třetího tisíciletí. [19] Díky své velikosti, která zaručuje jedinečné vlastnosti nanovláken, vykazují nanomateriály skokové vylepšení kvality konečných produktů (například v porovnání s mikromateriály). Nanovlákná mají tisícinásobně větší povrchovou plochu než např. mikrovlákná, relativně dobrou prodyšnost při malé velikosti pórů. Společnost Elmarco je první firmou, která nabízí zařízení k průmyslové výrobě nanovláknenných materiálů ke komerčnímu využití. [20]



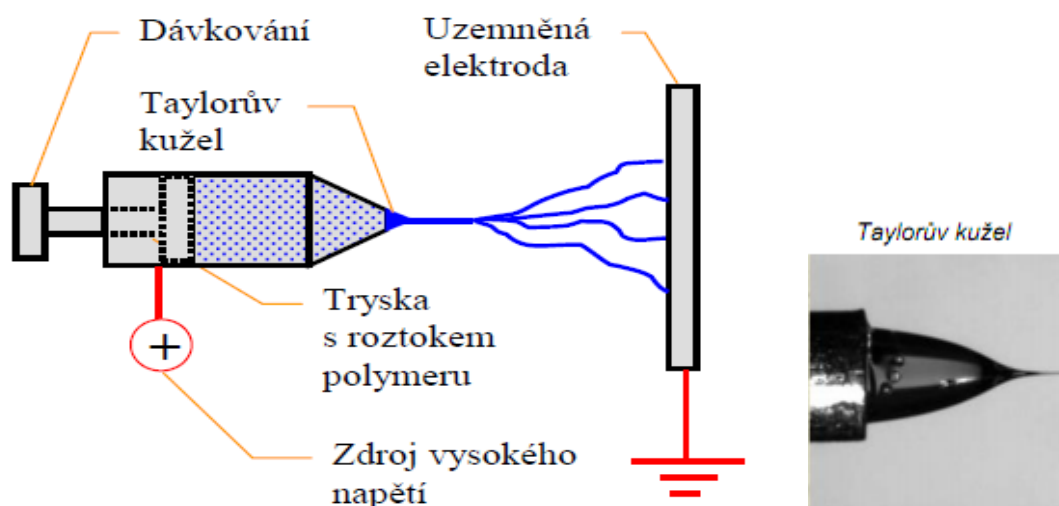
Obr. 14 Nanovlákná a vlas.[21]

2.10.2 Vlastnosti nanovláken

- Vlastnosti
 - velký měrný povrch
 - vysoká poróznost
 - malá velikost pórů
 - průměr vláken (do 1000) nm
 - polymerní roztoky nebo taveniny (PVA, PA, PU....) [22]

2.10.3 Elektrostatické zvlákňování a jeho modifikace Nanospider

Nejpoužívanější způsob výroby nanovláken je elektrostatické zvlákňování (electrospinning). Elektrostatické zvlákňování je proces využívající elektrostatických sil k utváření jemných vláken z polymerního roztoku nebo polymerní taveniny. Umožňuje výrobu polymerních vláken s průměrem od několika nanometrů do jednoho mikronu.

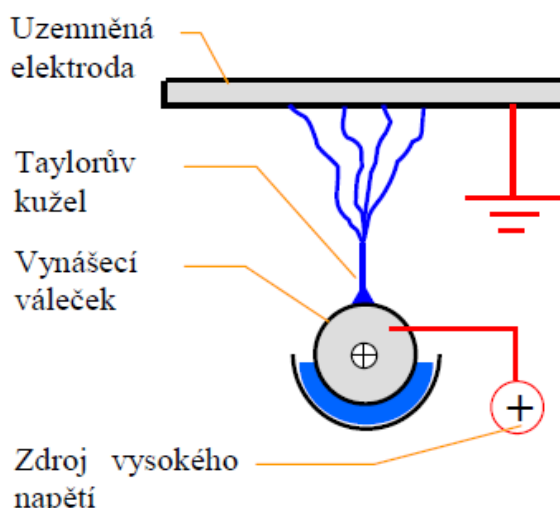


Obr. 15 Schéma principu elektrostatického zvlákňování.[22]

Obr. 15 popisuje princip elektrostatického zvlákňování, v jehož procesu je využito vysoké napětí k vytvoření elektricky nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny. Elektroda vysokého napětí je spojena přímo s polymerním roztokem. Roztok je následně zvlákňován kapilárou (zvlákňovací tryskou). Díky vysokému elektrickému napětí mezi špičkou kapiláry a uzemněným kolektorem vzniká tzv. Taylorův kužel na špičce kapiláry, z kterého jsou produkována submikronová vlákna. Vlákna ztuhnou po odpaření rozpouštědla a vytvoří vláknennou vrstvu na povrchu kolektoru.[22]

Nevýhodou elektrostatického zvlákňování je velmi malá výrobnost zvlákňovacího zařízení a hmotová nestejnoměrnost vzniklé vrstvy. Proto byla na Katedře netkaných textilií v Liberci vyvinuta metoda Nanospider v různých variantách.

Počátky metody Nanospider sahají do roku 2001 a její princip ukazuje obr. 16. Elektroda se ve tvaru válečku brodí v polymerním roztoku, který je válečkem vynášen blíže opačné elektrodě. Na pohybující hladině polymeru se samovolně vytvářejí skupiny Taylorových kuželů, z kterých jsou vytvářena jemná vlákna, jejichž měrný povrch je tak velký, že ještě před dopadem na opačnou elektrodu jsou vlákna vysušena. [4]



Obr. 16 Schéma principu zvlákňování pomocí metody Nanospider.[22]

Výrobnost technologie Nanospider se pohybuje mezi 1 až 5 g.min⁻¹.m⁻¹ (metr šíře role), což je ve srovnání s výrobností 0,1 až 1 g. hod⁻¹ původní metody elektrospinning výrazný pokrok. Další výhodou této metody je využití proudu vzduchu pro efektivní odstranění rozpouštědla ze vznikajících vláken, případně dosažení lepší hmotové stejnoměrnosti a objemnosti vzniklé vláknenné vrstvy. Vzniklá nanovláknna se ukládají na odváděcí pás nebo na pokladovou textilií.[4]

Uvedená technologie se dále vyvíjí a dnes jsou známa a používána i jiná uspořádání a tvary jednotlivých elektrod.

2.10.4 Struktura nanovláken

Elektrostatickým zvlákňováním lze vyrobit nanovláknna s různou strukturou. Nejčastěji se vyrábí nanovláknna s hladkým povrchem, pevným jádrem a kruhovým průřezem. V současné době probíhá i vývoj nových typů struktur u nanovláken. Například nanovláknna s porézní strukturou, bikomponentní nanovláknna (struktura jádro - plášť), kde se využívá speciálně upraveného elektrospineru s tryskou umožňující obklopení jednoho proudu taveniny (jádro) jiným proudem taveniny (plášť), dále dutá nanovláknna, jejichž struktura se získá mechanickým mísením dvou nemísitelných tavenin nebo rozptýlením fibrilek jednoho polymeru v tavenině polymeru druhého a následné odstranění jedné složky ze zhotovených nanovláken. Pro výrobu dutých nanovláken se používají upravené elektrospiny a jedná se o tzv. koaxiální elektrostatické zvlákňování, kterým lze získat pozitivní vlastnosti s ohledem na cíl a jejich použití.

2.10.5 Výhody a nevýhody nanovláken v kapalinové filtraci

Výhodou nanovláknenných textílií pro kapalinovou filtraci je dosažení stejné efektivity filtrace při nižších hodnotách tlakového spádu, než by bylo možno dosáhnout konvenčními materiály. Proto lze s nanovláknny vyrobit efektivnější filtr, který klade menší odpor proudění kapaliny. Další výhodou nanovláken ve srovnání s jinými textiliemi je prodloužení životnosti filtru z hlediska jeho čištění. K čištění filtrů se často používá technika zpětných pulzů, kdy krátké intenzivní pulzy proudění v opačném směru, než je normální směr proudění, zbaví filtr nánosů zachyceného materiálu. Když je filtr vybaven nanovláknennou vrstvou, částice se zachytávají na povrchu a k očištění filtru stačí méně pulzů než u normálních filtrů.

Nevýhodou nanovláknenných vrstev je nízká mechanická pevnost díky malým přitažlivým silám, které působí mezi nanovláknny a nízká přilnavost (adheze) k podkladu.[20]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíl práce

Cílem experimentu je potvrdit nebo vyvrátit možnost aplikace nanovláken jako alternativy ke zvýšení účinnosti olejových filtrů ve spalovacích motorech. K měření použijeme pomocné filtrační zařízení simulující filtraci oleje v motorovém systému, pomocí kterého bude možné stanovit efektivitu filtrace a které je blíže popsáno v kap. 3.3. Jako materiál byla zvolena PVA (polyvinylalkohol) nanovláknina na podkladové textilii, kde bylo využito rozdílných plošných hmotností nanovláknenné vrstvy. Důvodem volby PVA nanovláken je především snadná a ekologicky výhodná příprava, kdy dochází ke zvlákňování z vodného roztoku bez přítomnosti toxických příměsí. Uvedený materiál byl dříve zkoušen pro vzduchovou filtraci a shledán nevhodným zejména z důvodu silného botnutí vláken působením vzdušné vlhkosti. Tato nevýhoda odpadá při filtraci oleje. Výhodou nanovláken by měl být velký měrný povrch při nízké hmotnosti, malé průměry vláken a vysoká poróznost. Malá velikost pórů zabezpečuje neprůchodnost i těch částíček nečistot, které není běžný olejový filtr schopen zachytit. Malé průměry vláken zajišťují vysokou filtrační účinnost, ale současně je dosahováno i nízkého tlakového spádu. Nízká váha koresponduje s úspornou výrobou díky materiálovým úsporám.

V experimentální části byl v první řadě popsán použitý materiál v procesu filtrace oleje. Pokračuje popisem cílů, kdy byla ověřována propustnost vyšší pro nanovláknenný materiál v porovnání s konvenčními materiály, dále nalezení vhodné plošné hmotnosti textilie s PVA nanovláknem použitelné pro olejové filtry a nakonec vyhodnocení efektivit nanovláknenných filtrů optimálních pro filtraci oleje. Lze očekávat, že s růstem plošné hmotnosti poroste i tlakový spád a efektivita.

Hlavním úkolem bylo aplikovat nanovláknina do olejových filtrů a tím vytvořit nový produkt, který následně porovnat se současnými produkty a vyhodnotit, zda se jímlepší stávající vlastnosti filtračních materiálů používaných pro olejové filtry. Předpokladem byla zvýšená účinnost filtrace s nižším poklesem tlaku při průtoku, než je u filtrace konvenčních filtračních materiálů.

3.2 Použitý materiál

Testovaný materiál byl zvolen běžně dostupný a relativně snadno zvláknitelný polymer PVA (polyvinylalkohol), ze kterého bylo připraveno 9 textilií s nanovláknennou vrstvou o velikosti $0,1 \text{ m}^2$ každé. Vrstvy se od sebe lišily rozdílnou odtahovou rychlostí při přípravě vzorků, hlavní předpokládanou proměnnou tedy byla plošná hmotnost. Při samotném procesu zvlákňování bylo použito 9 rozdílných rychlostí posuvu podkladové textilie a to $v = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 4,5; 5 \text{ m/min}$. Největší plošnou hmotnost vykazovala textilie s nejnižší odtahovou rychlostí $v = 0,5 \text{ m/min}$ a byla označena jako vzorek č. 1. Naopak textilie s největší odtahovou rychlostí $v = 5 \text{ m/min}$ zaujímal plošnou hmotnost nejmenší a byla označena jako vzorek č. 9. Z uvedeného je patrné, že s rostoucí odtahovou rychlostí klesá plošná hmotnost testovaných textilií.

Pro filtrační aplikace je vhodné z důvodu nedostatečné pevnosti samotné nanovláknenné vrstvy použít podkladové textilie. V našem případě byl zvolen podkladový materiál typu spunbond s antistatickou úpravou.

Pro srovnání filtračních vlastností bylo provedeno vyhodnocení dat všech měření i s materiály olejových filtrů, které jsou běžně používány ve spalovacích motorech. Vybrán a následně rozebrán byl olejový filtr s celulózovou vložkou do motocyklu Fram G4164 (vzorek č. 10) a olejový filtr s celulózovou vložkou do automobilu Filtron OE 671 (vzorek č. 11). Označení vzorků je uvedeno v tab. 2.

Z těchto nanovláknenných textilií byly v průběhu testování filtračních vlastností (prodyšnost) vybrány nejlépe vyhovující pro další experimenty a z nich vyrobeno větší množství vzorků kruhového tvaru o průměru $2,8 \text{ cm}$ a ploše $6,15 \text{ cm}^2$ (od každého druhu textilie 3 vzorky). Tyto vzorky sloužily jako testované filtry.

Testovací kapalinou byl znečištěný polysyntetický motorový olej Castrol 10W40. Jedná se o vyjetý olej z benzínového motoru po 10 000 kilometrovém proběhu.

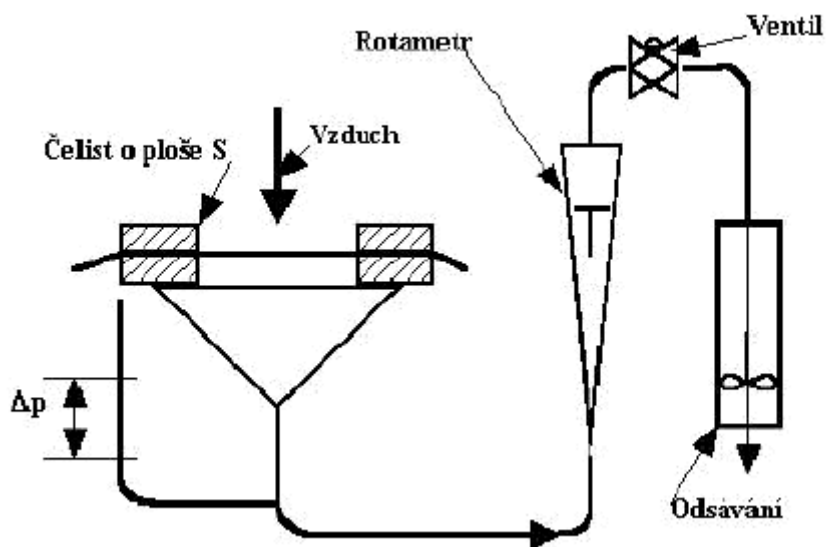
3.3 Testování prodyšnosti vzduchu

Cílem této úlohy bylo změřit průtok vzduchu skrz připravené textilie při konstantním tlakovém spádu a ověřit, zda textilie s nanovláknennou vrstvou budou vykazovat nižší propustnost vzduchu než textilie na bázi celulózy, a tím potvrdit jejich možné využití pro zlepšení filtračních vlastností olejových filtrů v automobilovém průmyslu. Důvodem použití vzduchové prodyšnosti je zejména jeho rychlost a dostupnost. Lze předpokládat, že materiály s obdobnou vzduchovou prodyšností budou mít i obdobnou propustnost oleje.

U všech textilií bylo provedeno měření prodyšnosti na zařízení Metefem typ FF-12/A. Zařízení a jeho schéma můžeme vidět na obr. 17 a 18. Podstatou zkoušky je měření množství nasávaného vzduchu rotametrem, což je trubice o přesně stanoveném průměru, ve které je umístěn plováček. Podle výše plováčku v trubici se stanoví množství proudícího vzduchu v Pascalech, který prochází mezi protilehlými plochami textilie vztažené k času a testované ploše měřené při standardizovaném tlakovém spádu, který má být 196 Pa (20 mm H₂O) při ploše čelisti 20 cm². Čelist má kruhový tvar, v níž je upnut vzorek textilie a z něhož je odsáván vzduch ventilátorem.[27]



Obr. 17 Příklad Metefem typ FF – 12/A.



Obr 18. Schéma zařízení pro měření prodyšnosti. [27]

Každá nanovláknenná i celulózová textilie byla umístěna na dolní kruhovou podložku a byla upnuta horní kruhovou čelistí o průměru 20 cm². Tlakový spád byl nastaven na 196 Pa a nastala realizace vlastního měření, kdy každá textilie byla proměřena na 10 místech. Výsledky měření jsou uvedeny v příloze 1. Z odečtených hodnot průtoku byla vypočtena jejich průměrná hodnota a prodyšnost.

Výpočet prodyšnosti jsme provedli na základě vzorce:

$$W = \frac{100 \cdot \bar{Q}}{36 \cdot S} \quad (5),$$

kde W je prodyšnost [l.m⁻².s⁻¹], Q je měřený průtok [l/h] a S je zkušební plocha [cm²].

Zkušební plocha S byla v našem případě 20 cm².

Odtahové rychlosti jednotlivých textilií v , průměrné hodnoty průtoku \bar{Q} a vypočítané hodnoty prodyšnosti W jednotlivých textilií jsou uvedeny v tab. 2.

vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
v [m/min]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	4,5	5	-	-
\bar{Q} [l/h]	60	127	201	267	445	625	980	1255	1690	4460	3060
W [l.m ⁻² .s ⁻¹]	8,3	18	28	37	62	87	136	174	235	619	425

Tab. 2 Naměřené a vypočítané hodnoty na přístroji Metefem typ FF – 12/A.

Z tab. 2 je možné pozorovat, že nejvyšší prodyšnost byla naměřena u celulózových textilií. Je to způsobeno tím, že filtry vyrobeny na bázi celulózy nejsou konzistentní ve velikosti a tvaru, což umožňuje projít větším nečistotám. Naopak nanovláknna díky svým malým průměrům a konzistenci velikosti a tvaru umožňují zachytávat menší částice, a tak zadržovat více nečistot. Prodyšnost nanovláknenných textilií nepřímo úměrně roste s jejich plošnou hmotností. S růstem plošné hmotnosti se snižuje počet pórů, což vede k následnému snížení prodyšnosti. Textilie s nejmenší plošnou hmotností (vzorek č. 9) vykazuje dvojnásobně až trojnásobně nižší průtok a prodyšnost vzduchu než běžně

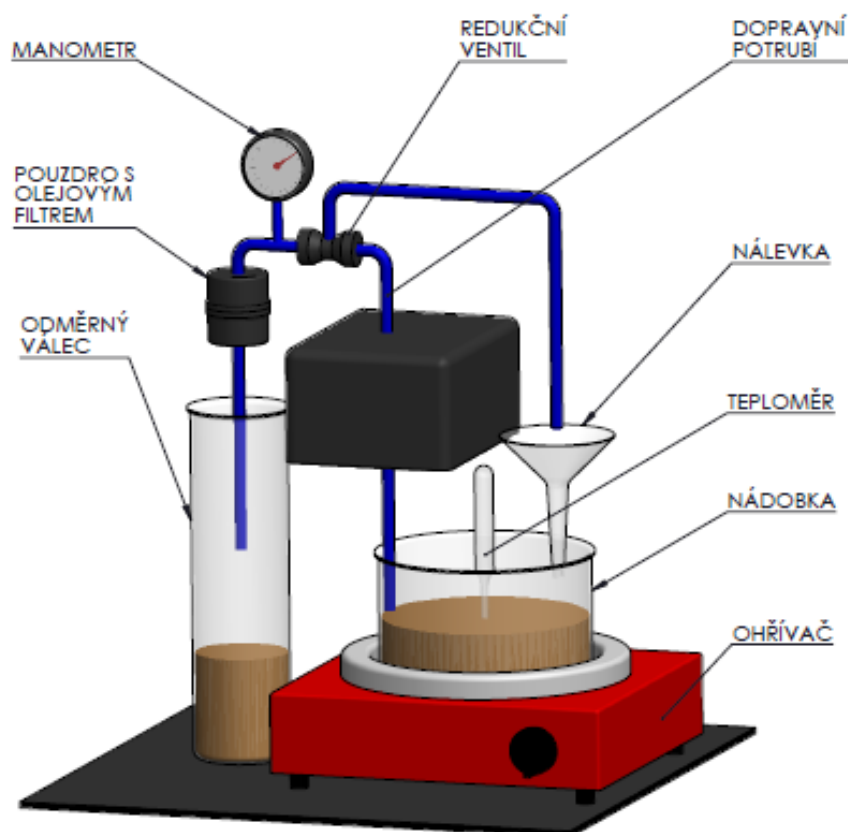
používaný celulózový materiál, čímž můžeme předpokládat také zachyt částic s dvojnásobně až trojnásobně nižším průměrem.

Celkově nižší prodyšnost nanovláknenných vrstev nemusí být neřešitelným problémem. V podstatě to znamená nutnost dvojnásobného až trojnásobného zvýšení povrchu filtru. Použít ještě slabší nanovláknennou vrstvu by bylo velmi problematické z důvodu nízké pevnosti. Výsledkem testu je rozhodnutí použít pro simulaci filtraci oleje vzorek č. 9 (nejslabší), pro porovnání i vzorek č. 6 a oba vzorky filtrů reálných (10,11).

3.4 Určení propustnosti oleje nanovláknenného filtru

3.4.1 Popis zařízení simulujícího filtraci oleje

Pro zhodnocení propustnosti a následně efektivity byl přes vybrané vrstvy filtrován znečištěný polosyntetický motorový olej Castrol 10W40 z benzínového motoru po najetých 10 000 kilometrech. Testování filtračních vlastností bylo realizováno na pomocném filtračním zařízení vyvinutém na Katedře netkaných textilií Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci. Zařízení bylo připraveno k simulaci filtrace oleje v motorovém systému a jeho schéma je znázorněno na obr. 19.



Obr. 19 Schéma filtračního zařízení.

Olej umístěný v nádobě je vložen do zařízení pro ohřev oleje sloužícího k zahřátí oleje na potřebnou teplotu, kterou kontrolujeme pomocí teploměru. Po celou dobu měření byl teploměr nastaven na běžnou provozní teplotu oleje 100-120°C. Čerpadlo zajišťuje tlak oleje v soustavě. Olej je čerpán z nádoby, který teče přepouštěcími hadičkami přes filtr do odměrného válce, který slouží k zachytu a určení množství přefiltrovaného oleje. Olej vstupuje do filtru pod tlakem, který regulujeme stlačováním hadičky pomocí uzavíratelného ventilu a následně ho měříme digitálním tlakoměrem. Filtr je rozebíratelný s vyměnitelnou filtrační vložkou, na které se hromadí mechanické nečistoty. V případě ucpání filtru nám poslouží zpětná nálevka, která dopraví nepřefiltrovaný olej zpět do nádoby.

3.4.2 Měření a výsledky koeficientu propustnosti oleje

Z vybraných textilií (vzorky č. 6, 9, 10, 11) bylo vyrobeno větší množství vzorků vhodných velikostí dle rozměrů filtru. Od každého druhu textilie byly vyrobeny 3 vzorky kruhového tvaru o průměru 2,8 cm a ploše 6,15 cm², které sloužily jako plošné filtry. Filtry

byly postupně upínány do filtračního zařízení, kde byl měřen čas průtoku při určitém tlaku, který byl pomocí uzavíratelného ventilu nastavován na manometru. U každého vzorku bylo zaznamenáno 5 hodnot (viz. příloha 2). Z těchto naměřených hodnot byl dopočítán průtok oleje, koeficient propustnosti a stanovena závislost průtoku oleje na tlaku, kde předpokladem bylo, že s rostoucím tlakem se průtok bude zvyšovat.

Vztah pro výpočet průtoku oleje je následující:

$$Q = \frac{V \cdot 10^{-6}}{t} \left[\text{m}^3/\text{s} \right] \quad (6),$$

kde Q je množství oleje, které proteče vzorkem za jednotku času [m^3/s], V je množství oleje naměřeného v odměrném válci [ml] a t je čas [s].

Příklad výpočtu průtoku oleje pro vzorek č. 6 z 1. měření, jehož $T = 100^\circ\text{C}$, $p = 5100 \text{ Pa}$, $V = 5 \text{ ml}$ a $t = 12 \text{ s}$ dle vztahu (6):

$$Q = \frac{V \cdot 10^{-6}}{t} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{12} = 0,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$$

Výpočty průtoku oleje všech vzorků byly provedeny stejným způsobem a to dosazením příslušných hodnot jednotlivých vzorků do vztahu (6). Výsledky průtoků jsou zaznamenány v příloze 2.

Koeficient propustnosti oleje se počítá dle vzorce:

$$K = \frac{Q}{\Delta p \cdot A} \left[\text{m} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \right] \quad (7),$$

kde Q je průtok oleje filtrem [m^3/s], Δp je tlakový spád filtru [Pa] a A je plocha filtru [m^2].

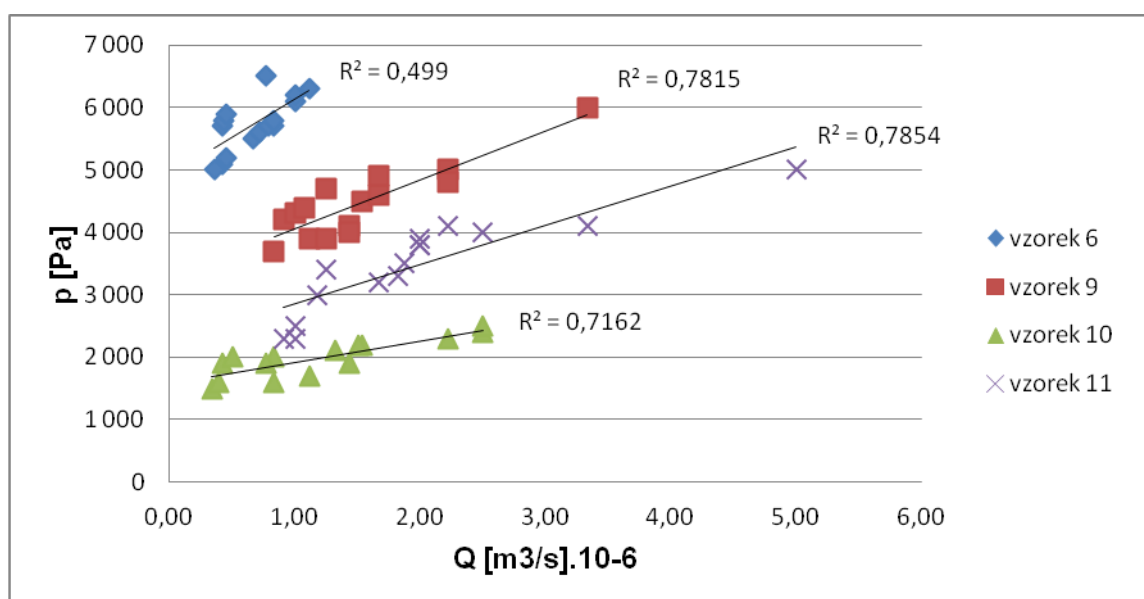
Příklad výpočtu koeficientu propustnosti oleje pro vzorek č. 6 z 1. měření, jehož $T = 100^\circ\text{C}$, $p = 5100 \text{ Pa}$, $V = 5 \text{ ml}$, $t = 12 \text{ s}$, $Q = 0,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ a $A = 6,15 \text{ cm}^2$ dle vztahu (7):

$$K = \frac{Q}{\Delta p \cdot A} = \frac{0,42 \cdot 10^{-6}}{5100 \cdot 6,15 \cdot 10^{-4}} = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

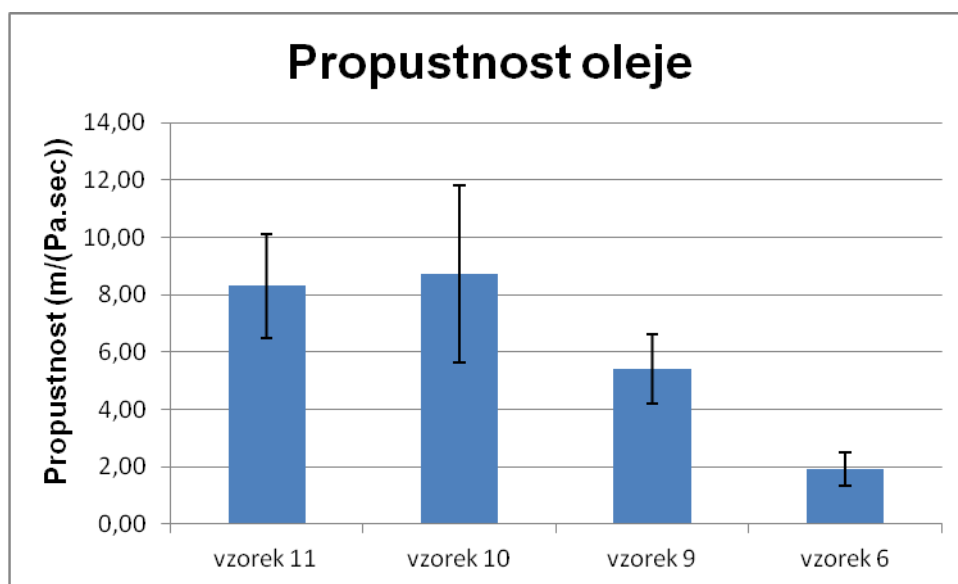
Výpočty koeficientu propustnosti oleje všech vzorků byly provedeny stejným způsobem a to dosazením příslušných hodnot jednotlivých vzorků do vztahu (7). Činná plocha činila pro všechny vzorky $6,15 \text{ cm}^2$. Výsledky koeficientů propustnosti jsou zaznamenány v příloze 2.

Všechny tabulky naměřených a dopočítaných hodnot potřebné pro vytvoření grafu závislosti průtoku na tlaku a grafu propustnosti oleje jsou uvedeny v příloze 2.

Závislost průtoku oleje na tlaku jednotlivých vzorků znázorňuje graf 1, propustnost oleje jednotlivých vzorků znázorňuje graf 2.



Graf 1: Závislost průtoku oleje na tlaku jednotlivých vzorků (vzorků č. 6, 9, 10 a 11).



Graf 2: Propustnost oleje jednotlivých vzorků.

Z grafu 1 je patrné, že s rostoucím tlakem roste průtok oleje u všech vzorků. Naměřená data závislosti průtoku na tlakovém spádu značně kolísají zejména z důvodu nepřesného měření průtoku oleje, z toho důvodu není proložení dat příliš přesné. Výsledek porovnání propustnosti oleje (graf 2) zhruba odpovídá výsledku měření prodyšnosti vzduchu. Nižší propustnost nanovláknenných vrstev je nutné řešit zvýšením plochy filtru.

3.5 Vyhodnocení efektivity PVA nanovláknenného filtru

3.5.1 Zastoupení částic nečistot v oleji na základě mikroskopického zhodnocení

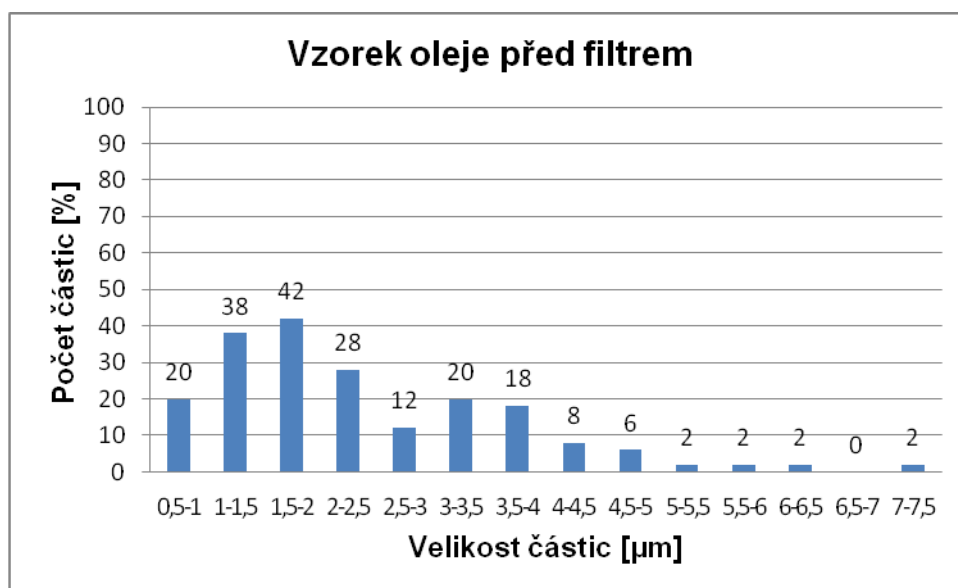
Aby mohla být stanovena efektivita nanovláknenného filtru, muselo být provedeno mikroskopické zhodnocení oleje protékajícího přes filtry. V praxi je pro podobný test použit laserový počítací částic, jenž byl pro tuto práci nahrazen metodou mikroskopickou. Měřena byla velikost a počet částic nečistot ve vzorcích oleje před a za filtrem. Vzorky oleje byly odebrány v průběhu testu koeficientu propustnosti oleje. Tyto hodnoty definují, jak účinně filtrační vložka odstraňuje částice nečistot a kolik částic je schopna přibližně zadržet. K tomuto měření byl použit laboratorní optický mikroskop Nikon Eclipse LV 100 (viz. obr. 20), u kterého bylo předpokladem pozorování částic přibližně od velikosti 700 nm. Velikost pod 700 nm byla vzhledem k rozlišení optického mikroskopu na hranici měřitelnosti. Vzorky oleje

byly vyhodnocovány při padesátinásobném zvětšení. Pro test byly použity vzorky č. 6, 9 a 11 (vzhledem k podobným vlastnostem vzorků č. 10 a 11 byl vybrán pouze jeden).



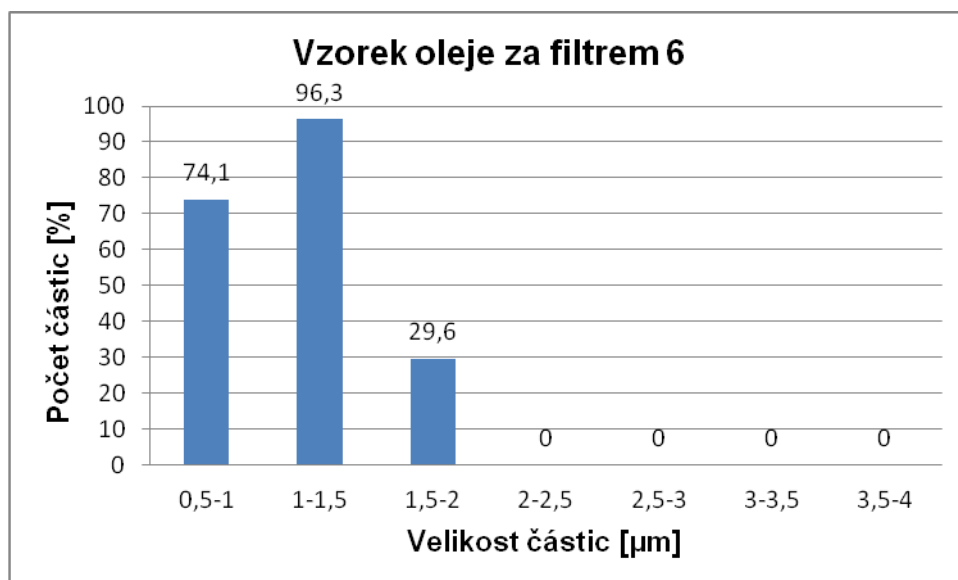
Obr. 20 Optický mikroskop Nikon Eclipse LV 100.

Zastoupení částic jednotlivých vzorků oleje před a za filtrem znázorňují grafy 3 – 6. Jedná se o histogramy četností, kde jednotlivé naměřené velikosti částic byly roztrženy do tříd a u každé třídy byla spočtena jejich četnost vyjádřena v procentech. U vzorku nefiltrovaného oleje použitého k filtraci všech vrstev (olej před filtrem) vzniklo 14 tříd a u zbylých vzorků (olej za jednotlivými filtry) vzniklo 7 tříd. Velikost třídy byla zvolena u všech vzorků po 0,5 μm . Celkový počet měření na jednom vzorku se pohyboval od 27 do 100 hodnot.

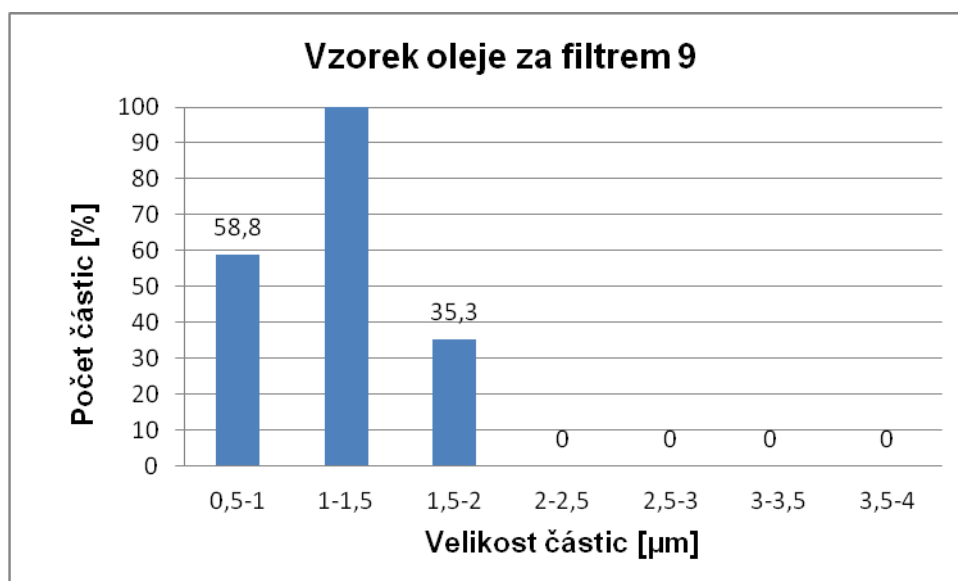


Graf 3: Zastoupení částic ve vzorku oleje před filtrem.

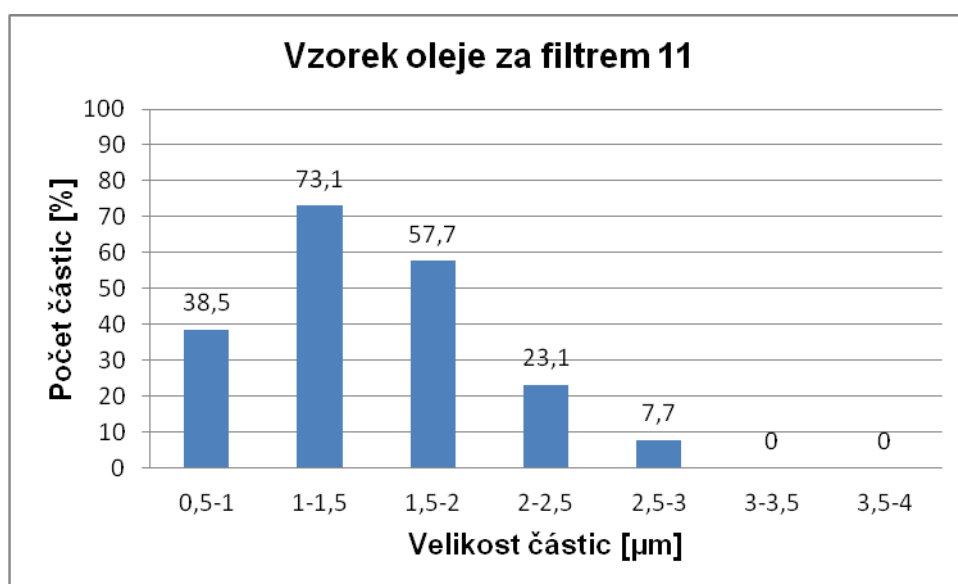
Z grafu 3, tedy histogramu zastoupení částic nefiltrovaného oleje použitého k filtraci všech vrstev vyplývá, že naměřené hodnoty velikostí částic se možná pohybují v bimodálním rozdělení (může se jednat i o chybu měření).



Graf 4: Zastoupení částic ve vzorku oleje za nanovlákněným filtrem č. 6.



Graf 5: Zastoupení částic ve vzorku oleje za nanovlákněným filtrem č. 9.



Graf 6: Zastoupení částic ve vzorku oleje za celulóзовým filtrem č. 11.

Každý vzorek oleje byl pod mikroskopem pro větší přesnost měření rozdělen do pěti stejných částí, kde z každé části u každého vzorku bylo měřeno množství a velikost částic nečistot. Počet nalezených částic byl přibližně 2krát menší za celulóзовým filtrem než na vstupu a přibližně 3krát menší za nanovlákněnými filtry než na vstupu (viz. příloha 3). Ve vzorku oleje před filtrem byly nalezeny částice o velikosti až do 7,5 μm a největší množství částic nečistot o velikosti od 1,5 μm do 2 μm a to z 42%. Ve vzorcích oleje za

nanovláknými filtry byla zaznamenána přítomnost částic nečistot do 2 µm u obou a to v množství 29,6 % o velikosti částic od 1,5 µm do 2 µm nanovlákného filtru s větší plošnou hmotností a o trochu více 35,3 % pro téže velikost u nanovlákného filtru s menší plošnou hmotností. Vzorek oleje za celulózovým filtrem zaznamenal přítomnost částic do velikosti 3 µm.

Všechny tabulky hodnot potřebné pro vytvoření histogramů zastoupení částic ve vzorcích oleje před a za filtrem jsou uvedeny v příloze 3.

3.5.2 Histogram efektivit PVA nanovlákného filtru

Na základě mikroskopických měření byla následně stanovena efektivita testovaných filtrů. Předpokladem byl účinný záchyt částic nečistot nanovlákného filtru od velikosti 2 mikrometry.

Vliv nanovlákných vrstev na účinnost filtrace znázorňuje graf 7 a graf 8. Graf 9 slouží po porovnání a znázorňuje vliv celulózového filtru na účinnost filtrace. Jedná se o histogramy četností, kde jednotlivé naměřené velikosti částic byly roztrženy do tříd a u každé třídy byla spočtena jejich efektivita vyjádřena v procentech. U všech zkoušených filtrů vzniklo 7 tříd a velikost třídy byla zvolena u všech vzorků po 0,5 mikrometrech.

Pro výpočet efektivit jednotlivých filtrů bylo nutné znát hodnoty z předchozího experimentu. Uvažujeme-li vzorek filtru č. 6, pak jsou jeho hodnoty naměřeného počtu částic před a za filtrem uvedeny v tab. 3. Dosazením příslušných hodnot do vztahu (2) získáme efektivitu vyjádřenou v procentech.

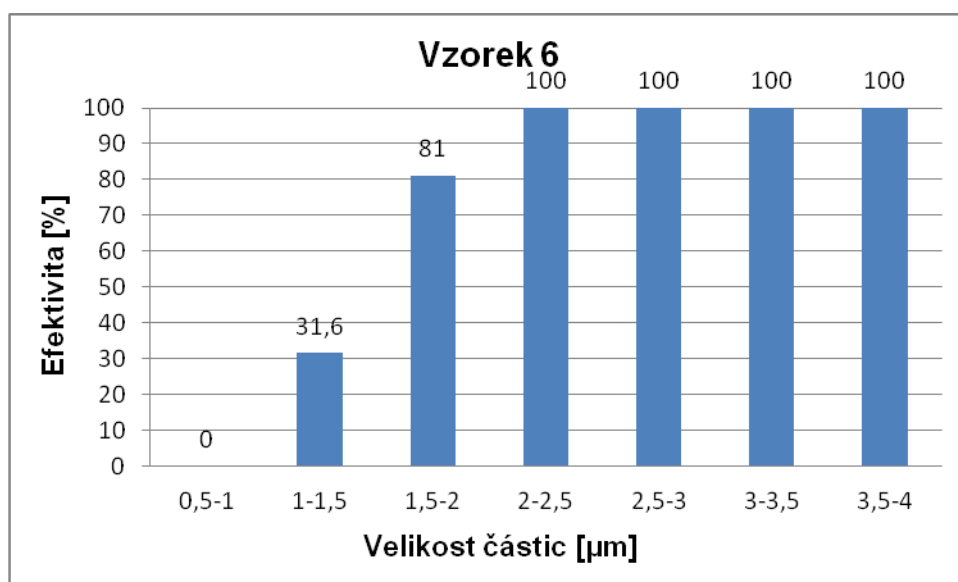
Příklad výpočtu efektivit filtru č. 6 o velikosti částic od 1 µm do 1,5 µm, jehož celkové množství částic nalétávající na filtr G_1 je 19 a množství částic nezachycených filtrem G_2 je 13 dle vztahu (2):

$$E = \left(1 - \frac{G_1}{G_2}\right) \cdot 100 = \left(\frac{G_2 - G_1}{G_2}\right) \cdot 100 = \left(\frac{19 - 13}{19}\right) \cdot 100 = 31,6\%$$

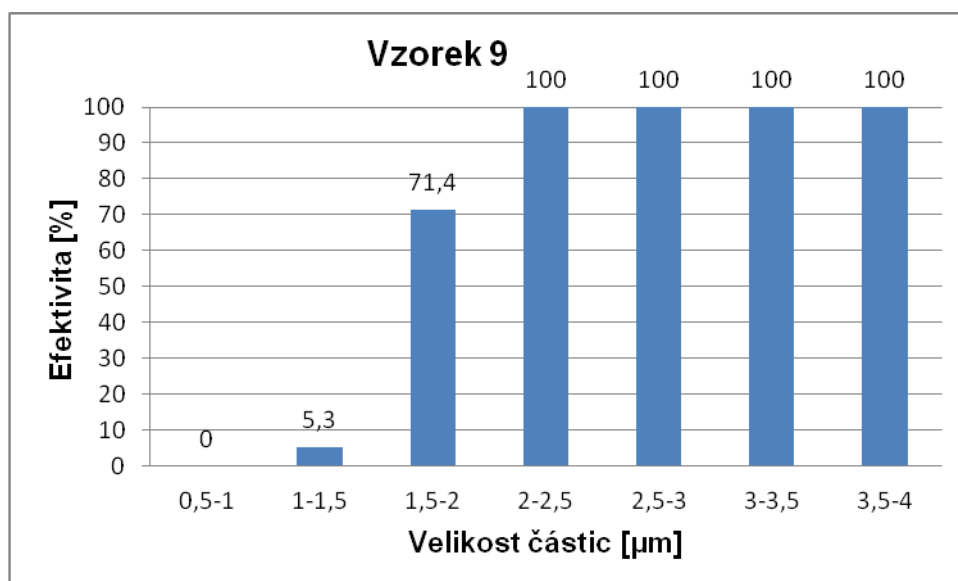
Třída	Počet částic před filtrem[-]	Počet částic za filtrem[-]	Efektivita[%]
0,5-1	10	10	0
1-1,5	19	13	31,5789474
1,5-2	21	4	80,952381
2-2,5	14	0	100
2,5-3	6	0	100
3-3,5	10	0	100
3,5-4	9	0	100

Tab. 3 Příklad výpočtu efektivity zachytu částic nečistot filtru 6

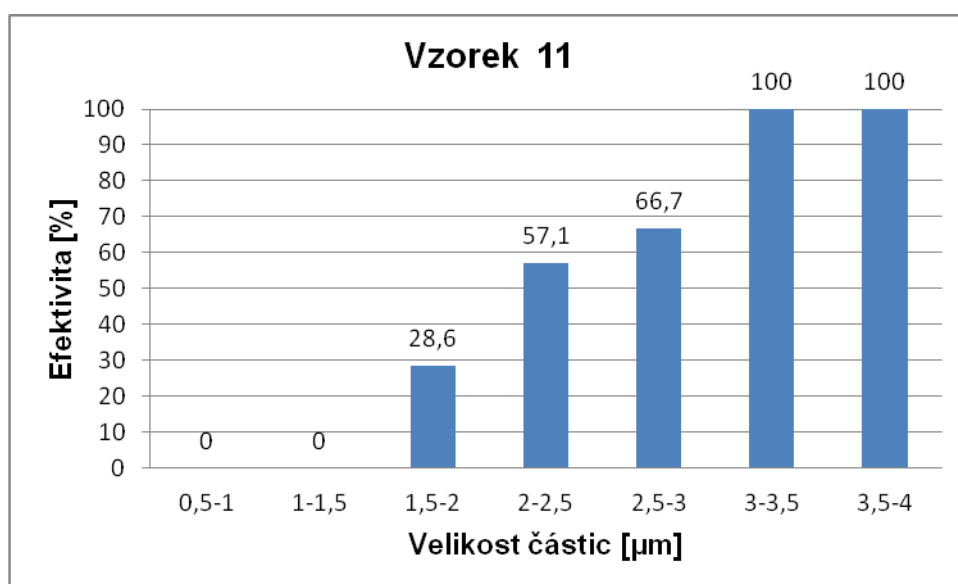
Výpočty efektivity všech vzorků byly provedeny stejným způsobem a to dosazením příslušných hodnot jednotlivých vzorků do vztahu (2). Výsledky efektivit všech vzorků jsou zaznamenány v příloze 3.



Graf 7: Vliv nanovlákněné vrstvy filtru č. 6 na účinnost filtrace.



Graf 8: Vliv nanovlákněné vrstvy filtru č. 9 na účinnost filtrace.



Graf 9: Vliv celulóзовého filtru na účinnost filtrace.

Z histogramů zachytu částic nečistot je patrné, že částice nanovlákněných filtrů o velikostech nad 2 mikrometry byly odfiltrovány s 100% účinností. Filtr s větší plošnou hmotností (vzorek č. 6) filtroval částice do velikosti 1,5 μm z 31,6% a od velikosti 1,5 μm do 2 μm až z 81%. U nejslabšího nanovlákněného filtru (vzorek č. 9) byly částice o velikosti do 1,5 μm odfiltrovány pouze s 5,3% účinností a částice o velikosti od 1,5 μm do 2 μm s 71,4% účinností. U obou nanovlákněných filtrů nebyly zlikvidovány žádné částice o velikosti pod 1

mikrometr. Z grafů vyplývá výrazně vyšší vliv silnější nanovlákněné vrstvy (vzorek č. 6) na účinnost filtrace pro velikosti částic nečistot od 1 μm do 1,5 μm v porovnání s nejslabší nanovlákněnou vrstvou (vzorek č. 9). Efektivita vzorku s vyšší plošnou hmotností je ale limitována nízkou propustností (vysoký tlakový spád). Pro porovnání lze vidět, že konvenčně používané olejové filtry na bázi celulózy jsou schopny účinně filtrovat částice řádově nad 3 mikrometry.

Tímto lze potvrdit fakt, že filtry s vrstvou nanovláken mohou snížit koncentraci částic nečistot v oleji oproti standardním filtračním médiím. Podmínkou je nutnost zvýšení plochy filtru pro snížení tlakového spádu.

4 ZÁVĚR

Cílem této práce byla příprava zařízení určeného k simulaci filtrace oleje v motorovém systému a následné testování filtračních vlastností PVA nanovlákných vrstev různých plošných hmotností s cílem zlepšit stávající vlastnosti filtračních materiálů používaných pro olejové filtry. Jednotlivé filtrační vlastnosti materiálu filtru byly porovnávány ve vztahu k plošné hmotnosti nanovlákných vrstev, které byly vyrobeny pomocí metody elektrostatického zvlákňování na Katedře netkaných textilií Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci. Použitý byl materiál PVA ve formě nanovláken zejména z důvodu snadné výroby a vhodné struktury (průměr vláken cca 400 nm, hmotová stejnoměrnost). Tato nanovlákná jednotlivých plošných hmotností byla transportována na podkladovou textilií typu spunbond s antistatickou úpravou. Naším cílem bylo získat plošnou hmotnost nanovlákné vrstvy vhodnou pro filtraci oleje ve spalovacím motoru. Pro porovnání se zkoušenými textiliemi s nanovláknou byl rozebrán komerční filtr a z něho použit filtrační materiál, který byl tvořen celulóзовými vlákny.

Jako prvotní úkol pro srovnávání a výběr vhodné plošné hmotnosti nebyla primárně volena zkouška přímo na filtračním zařízení, ale nejprve se měřila prodyšnost vzduchu (obdoba s propustností oleje), kde byla ověřena nižší prodyšnost textilií s nanovláknou vrstvou oproti textiliím na bázi celulózy. Tím bylo potvrzeno jejich možné využití pro zlepšení filtračních vlastností olejových filtrů v automobilovém průmyslu. Nejvyšší prodyšnost byla naměřena u celulóзовých vzorků, které mají nejvyšší pórovitost, dále pak u nanovlákného vzorku č. 9, který vykazoval dvojnásobně až trojnásobně nižší průtok a prodyšnost vzduchu než u zmíněných běžně používaných celulóзовých materiálů. Výsledkem testu bylo rozhodnutí použít pro simulaci filtrace oleje vzorek č. 9 (nejslabší), pro porovnání i vzorek č. 6 a oba vzorky filtrů reálných (10,11).

V druhém experimentu byla stanovena propustnost oleje nanovlákného filtru. Pro její zhodnocení byl přes vybrané vrstvy filtrován znečištěný polosyntetický motorový olej Castrol 10W40 z benzínového motoru po najetých 10 000 kilometrech. Testování filtračních vlastností bylo realizováno na pomocném filtračním zařízení vyvinutém na Katedře netkaných textilií Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci. Zařízení sloužilo k simulaci filtrace oleje v motorovém systému. Z naměřených dat byla stanovena závislost průtoku na tlakovém spádu, kde byl potvrzen růst průtoku oleje s rostoucím tlakem, a dále koeficient propustnosti. Proložení dat závislosti průtoku na tlakovém spádu nebylo příliš přesné, naměřená data značně kolísala. To bylo způsobeno nepřesností měření průtoku oleje. Propustnost nejslabší nanovlákné vrstvy (vzorek č. 9) je přibližně 2krát nižší než u

komerčního filtru. Výsledek porovnání zhruba odpovídal výsledku měření prodyšnosti vzduchu. Nižší propustnost nanovláknenných vrstev je nutné řešit zvýšením plochy filtru.

Třetí experiment se zabýval vyhodnocením efektivity PVA nanovláknenných filtrů. Pro její stanovení bylo nutné provést mikroskopické zhodnocení oleje protékajícího přes filtry. Pro měření částic, zhodnocení jejich velikosti a k vyhodnocení efektivity byl použit laboratorní optický mikroskop, kde se předpokládalo sledování částic od velikosti cca 700 nanometrů. Pro test byly použity vzorky č. 6, 9 a 11 (vzhledem k podobným vlastnostem vzorků 10 a 11 byl vybrán pouze jeden). Pro každý vzorek zvlášť byl sestaven histogram zastoupení částic nečistot v oleji před a za filtrem. Na základě těchto mikroskopických měření byla následně stanovena efektivita testovaných filtrů, kde byl potvrzen předpoklad úplného zachytu částic nečistot nanovláknenného filtru od velikosti 2 mikrometry a významný zachyt částic o velikosti 1 mikrometr. Pro porovnání bylo zjištěno, že konvenčně používané olejové filtry na bázi celulózy jsou schopny účinně filtrovat částice řádově nad 3 mikrometry. Vliv silnější nanovláknenné vrstvy (vzorek č. 6) na účinnost filtrace je výrazně vyšší pro velikosti částic nečistot od 1 μm do 1,5 μm v porovnání s nejslabší nanovláknennou vrstvou (vzorek č. 9). Efektivita vzorku s vyšší plošnou hmotností je ale limitována nízkou propustností (vysoký tlakový spád).

Tímto lze potvrdit fakt, že filtry s vrstvou nanovláken mohou snižovat koncentraci částic nečistot v oleji a tím vykazovat lepší vlastnosti oproti standardním filtračním médiím. Podmínkou je nutnost zvýšení plochy filtru pro snížení tlakového spádu. Při jejich pozorování kapalinové filtry s nanovrstvou na filtračním médiu zvyšují efektivitu zachytu, proto by je bylo vhodné používat do osobních automobilů. Životnost filtru je vlastnost, kterou by bylo potřeba dále prozkoumat.

5 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Hrůza, J.: *Automobilové filtry 1* [přednáška]. Liberec: TUL, 2009
- [2] *Otevřená encyklopedie* [online], [cit. 2011-09-13]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Filtrace>>
- [3] Hrůza, J.: *Filtrace a filtrační materiály*. KNT [online], [cit. 2011-09-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/filtr.pdf>>
- [4] Hrůza, J.: *Zlepšování filtračních vlastností vláknenných materiálů* [disertační práce]. Liberec: TUL, 2005
- [5] Pich, J.: *Teorie filtrace* [kandidátská disertační práce]. Praha: ČSAV, 1964
- [6] Brown, R. C.: *Air filtration* [1st edition]. Sheffield UK, 1993. ISBN 0 08 041274 2
- [7] Richter, M.: *Technologie ochrany životního prostředí*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2002.
- [8] Morávek, P.: *Problémy mikroklimatu obytných domů*. Můj dům, květen 2005.
- [9] Neckář, B.: *Morfologie a strukturní mechanika obecných vláknenných útvarů*. Skriptum TU Liberec. TU Liberec, 1998.
- [10] *Fibertex* [online], [cit. 2011-09-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.fibertex.com/cs-CZ/Produkty/Filtrace/Produkty/Pages/Liquidfiltration.aspx>>
- [11] Hrůza, J.: *Automobilové filtry 2* [přednáška]. Liberec: TUL, 2009
- [12] *Filtrace* [online], [cit. 2011-09-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.filtrace.com/cz>>
- [13] *Oleje* [online], [cit. 2011-09-20]. Dostupné z WWW: <http://oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_5>

- [14] *Filtr-filtry* [online], [cit. 2011-09-20]. Dostupné z WWW:
< <http://www.filtr-filtry.cz/17,0,Olejove-filtry.html>>
- [15] *Mjauto* [online], [cit. 2011-09-20]. Dostupné z WWW:
< <http://www.mjauto.cz/newdocs/bosch/boschfiltr.htm>>
- [16] *Škoda Panda* [online], [cit. 1999-10-22]. Dostupné z WWW:
<<http://skoda.panda.cz/clanek.php3?id=4>>
- [17] *Škoda Panda* [online], [cit. 2003-05-28]. Dostupné z WWW:
<<http://skoda.panda.cz/clanek.php3?id=406>>
- [18] *Obtokový čistič* [online], [cit. 2011-09-20]. Dostupné z WWW:
<http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4874>
- [19] *Otevřená encyklopedie* [online], [cit. 2011-10-01]. Dostupné z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Nanovl%C3%A1kno>>
- [20] *Elmarco* [online], [cit. 2011-10-01]. Dostupné z WWW:
<<http://www.elmarco.com>>
- [21] *Nanovlákn a vlas* [online], [cit. 2011-10-01]. Dostupné z WWW:
<http://www.tyden.cz/rubriky/domaci/ve-vyrobe-nanovlaken-je-ceska-firma-svetovou-jednickou_10582.html>
- [22] Jirsák, O., Lukáš, D.: *Výroba a vlastnosti nanovláken* [přednáška]. Liberec: TUL, 2009
- [23] *Oleje* [online], [cit. 2011-10-20]. Dostupné z WWW:
<http://oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju6>
- [24] *Mjauto* [online], [cit. 2011-10-21]. Dostupné z WWW:
< <http://www.mjauto.cz/filtry.htm>>
- [25] *Synlube* [online], [cit. 2011-10-21]. Dostupné z WWW:
< <http://www.synlube.com/oilfilters.htm> >

- [26] *Filtron* [online], [cit. 2011-10-21]. Dostupné z WWW:
< <http://www.filtron.pl/cz/index.php?idp=20>>
- [27] Kovačič, V.: *Textilní zkušebnictví*, 2.díl, Liberec: TUL, 2004, ISBN 80-7083-825-6
- [28] *Nanotextilie* [online], [cit. 2011-11-04]. Dostupné z WWW:
<<http://alice.fiserovi.cz/wp-content/uploads/2007/06/nanotextilie.pdf>>
- [29] *Moderní filtrační materiály* [online], [cit. 2011-11-20]. Dostupné z WWW:
<http://www.chvalis.cz/www/assets/Tribotechnika_clanek_Chvalis.pdf>
- [30] *Technický týdeník* [online], [cit. 2011-11-20]. Dostupné z WWW:
<<http://www.filtration.cz/doc/testy-dfe.pdf>>

6 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1

Naměřené hodnoty průtoku vzduchu nanovláknenných a celulózových textilií:

Číslo měření	Q[l/h]										
	vz.1	vz.2	vz.3	vz.4	vz.5	vz.6	vz.7	vz.8	vz.9	vz.10	vz.11
1.	45	120	180	300	425	750	1000	1200	1450	3000	4500
2.	55	110	200	310	400	550	950	1300	1400	3100	4500
3.	70	120	225	300	450	600	950	1100	1500	3100	4400
4.	50	130	225	260	350	550	900	1100	1400	3000	4300
5.	60	140	200	225	475	600	1000	1100	1500	3100	4200
6.	50	130	210	275	475	625	930	1150	1400	3200	5000
7.	80	130	200	250	475	600	900	1200	1500	3000	4500
8.	70	135	190	250	500	650	950	1100	1400	3000	4500
9.	60	140	200	250	500	700	950	1300	1400	3000	4500
10.	60	115	180	250	400	625	1000	1200	1350	3100	4200

PŘÍLOHA 2

Tabulky naměřených a dopočítaných hodnot potřebné pro sestavení grafu závislosti průtoku oleje na tlaku:

Vzorek 6

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	$\frac{K}{[m.Pa^{-1}.s^{-1}]}10^{-7}$
1.	100	5 100	5	12	0,42	1,33
2.	100	5 700	5	12	0,42	1,19
3.	100	5 800	10	23	0,43	1,22
4.	100	5 900	5	11	0,45	1,25
5.	100	6 500	10	13	0,77	1,92

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	$\frac{K}{[m.Pa^{-1}.s^{-1}]}10^{-7}$
1.	100	5 000	5	14	0,36	1,16
2.	100	5 200	5	11	0,45	1,42
3.	100	5 500	10	15	0,67	1,97
4.	100	5 700	10	12	0,83	2,38
5.	100	6 100	10	10	1,00	2,67

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	$\frac{K}{[m.Pa^{-1}.s^{-1}]}10^{-7}$
1.	100	5 600	10	14	0,71	2,07
2.	100	5 700	15	19	0,79	2,25
3.	100	5 800	10	12	0,83	2,34
4.	100	6 200	15	15	1,00	2,62
5.	100	6 300	10	9	1,11	2,87

Vzorek 9

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	$\frac{K}{[m.Pa^{-1}.s^{-1}]}10^{-7}$
1.	100	3 700	10	12	0,83	3,66
2.	100	3 900	10	9	1,11	4,63
3.	100	4 100	10	7	1,43	5,67
4.	100	4 500	20	13	1,54	5,56
5.	100	5 000	20	9	2,22	7,23

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	K [m.Pa ⁻¹ .s ⁻¹].10 ⁻⁷
1.	100	3 900	10	8	1,25	5,21
2.	100	4 000	10	7	1,43	5,81
3.	100	4 600	10	6	1,67	5,89
4.	100	4 800	20	9	2,22	7,53
5.	100	6 000	30	9	3,33	9,03

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	K [m.Pa ⁻¹ .s ⁻¹].10 ⁻⁷
1.	100	4 200	10	11	0,91	3,52
2.	100	4 300	10	10	1,00	3,78
3.	100	4 400	15	14	1,07	3,96
4.	100	4 700	15	12	1,25	4,32
5.	100	4 900	20	12	1,67	5,53

Vzorek 10

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	K [m.Pa ⁻¹ .s ⁻¹].10 ⁻⁷
1.	100	1 500	5	15	0,33	3,61
2.	100	1 600	5	13	0,38	3,91
3.	100	1 900	5	12	0,42	3,57
4.	100	2 000	5	10	0,50	4,07
5.	100	2 000	5	6	0,83	6,78

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	K [m.Pa ⁻¹ .s ⁻¹].10 ⁻⁷
1.	100	1 900	10	13	0,77	6,58
2.	100	2 100	25	19	1,32	10,19
3.	100	2 200	20	13	1,54	11,37
4.	100	2 200	15	10	1,50	11,09
5.	100	2 300	20	9	2,22	15,71

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	K [m.Pa ⁻¹ .s ⁻¹].10 ⁻⁷
1.	100	1 600	5	6	0,83	8,47
2.	100	1 700	10	9	1,11	10,63
3.	100	1 900	10	7	1,43	12,23
4.	100	2 400	30	12	2,50	16,94
5.	100	2 500	25	10	2,50	16,26

Vzorek 11

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	K [m.Pa ⁻¹ .s ⁻¹].10 ⁻⁷
1.	100	2 300	10	11	0,91	6,43
2.	100	2 500	10	10	1,00	6,50
3.	100	3 300	20	11	1,82	8,96
4.	100	3 900	20	10	2,00	8,34
5.	100	4 100	20	9	2,22	8,81

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	K [m.Pa ⁻¹ .s ⁻¹].10 ⁻⁷
1.	100	3 400	10	8	1,25	5,98
2.	100	3 800	20	10	2,00	8,56
3.	100	4 000	30	12	2,50	10,16
4.	100	4 100	20	6	3,33	13,22
5.	100	5 000	60	12	5,00	16,26

Číslo měření	T [°C]	p [Pa]	V [ml]	t [s]	Q [m ³ /s].10 ⁻⁶	K [m.Pa ⁻¹ .s ⁻¹].10 ⁻⁷
1.	100	2 300	10	10	1,00	7,07
2.	100	3 000	20	17	1,18	6,38
3.	100	3 200	10	6	1,67	8,47
4.	100	3 500	15	8	1,88	8,71
5.	100	3 800	10	5	2,00	8,56

PŘÍLOHA 3

Naměřené částice nečistot pod optickým mikroskopem

Velikost a množství částic v oleji před filtrem:

Položka	Délka[μm]	Položka	Délka[μm]	Položka	Délka[μm]	Položka	Délka[μm]
1.	1,13311	26.	1,20109	51.	1,46612	76.	3,53251
2.	1,6159	27.	0,99044	52.	2,1653	77.	1,36945
3.	0,67944	28.	1,94042	53.	3,45822	78.	4,19523
4.	0,96835	29.	0,70035	54.	1,4007	79.	3,65297
5.	1,13945	30.	5,59894	55.	3,84537	80.	2,43202
6.	0,91472	31.	2,24382	56.	2,89261	81.	3,63516
7.	1,18294	32.	1,6159	57.	1,52874	82.	3,65297
8.	0,99044	33.	1,57979	58.	1,4007	83.	5,17027
9.	1,82945	34.	1,63366	59.	1,44131	84.	4,35385
10.	2,04185	35.	2,46443	60.	1,63366	85.	3,48316
11.	1,89909	36.	2,49931	61.	2,64513	86.	4,79535
12.	1,80564	37.	2,56764	62.	1,29361	87.	4,56572
13.	1,83732	38.	2,77293	63.	1,08098	88.	4,93033
14.	3,63516	39.	2,84737	64.	2,29468	89.	7,20855
15.	1,57979	40.	1,13945	65.	3,60527	90.	2,26621
16.	1,10735	41.	1,86459	66.	2,88262	91.	3,91047
17.	1,74881	42.	1,56603	67.	3,3652	92.	2,28207
18.	1,63366	43.	2,14858	68.	6,39743	93.	1,66861
19.	2,29468	44.	3,03855	69.	3,3823	94.	4,08547
20.	1,27678	45.	1,27678	70.	3,07864	95.	3,02427
21.	1,10735	46.	1,70707	71.	2,20491	96.	0,87441
22.	0,96835	47.	1,98089	72.	3,09965	97.	4,01423
23.	1,2366	48.	1,96994	73.	3,84537	98.	3,32205
24.	1,3212	49.	2,0734	74.	3,48523	99.	1,48567
25.	0,96835	50.	1,87616	75.	2,06643	100.	0,93808

Velikost a množství částic v oleji za filtrem 6:

Položka	Délka[μm]	Položka	Délka[μm]
1.	1,36411	16.	1,11666
2.	1,47232	17.	1,47232
3.	0,97937	18.	1,00833
4.	1,37112	19.	1,36411
5.	0,80761	20.	1,54852
6.	0,97937	21.	1,49174
7.	1,31397	22.	1,14213
8.	1,27695	23.	1,67355
9.	1,18338	24.	1,77372
10.	0,92911	25.	0,97937
11.	0,74587	26.	0,98338
12.	0,84249	27.	0,7835
13.	0,92911		
14.	1,25421		
15.	1,66781		

Velikost a množství částic v oleji za filtrem 9:

Položka	Délka[μm]	Položka	Délka[μm]	Položka	Délka[μm]
1.	1,92416	16.	0,96953	31.	1,14213
2.	0,7835	17.	1,92416	32.	1,11666
3.	1,14213	18.	0,99877	33.	1,47919
4.	1,05482	19.	0,97937	34.	1,36411
5.	1,88386	20.	1,27695		
6.	1,54852	21.	1,39195		
7.	1,98308	22.	0,88686		
8.	0,92911	23.	1,10803		
9.	0,96953	24.	1,52355		
10.	1,08175	25.	1,23882		
11.	1,24654	26.	0,92911		
12.	0,83102	27.	1,17525		
13.	1,37112	28.	0,70624		
14.	1,11666	29.	1,30665		
15.	1,30665	30.	1,08175		

Velikost a množství částic v oleji za filtrem 11:

Položka	Délka[μm]	Položka	Délka[μm]	Položka	Délka[μm]	Položka	Délka[μm]
1.	2,11871	16.	1,23882	31.	1,41247	46.	1,49815
2.	2,21607	17.	0,83102	32.	0,92911	47.	0,96953
3.	1,54852	18.	1,37112	33.	1,7132	48.	2,23102
4.	1,88386	19.	1,19146	34.	1,10803	49.	1,36411
5.	0,98338	20.	0,88686	35.	1,69066	50.	1,27695
6.	2,64612	21.	2,09877	36.	1,05482	51.	1,67355
7.	1,25421	22.	0,99877	37.	0,83102	52.	1,17695
8.	1,55929	23.	1,49815	38.	0,88606		
9.	1,57919	24.	1,11666	39.	1,85823		
10.	1,944	25.	2,69146	40.	0,97937		
11.	1,52983	26.	0,83102	41.	1,66781		
12.	1,99754	27.	1,10803	42.	1,00695		
13.	1,66781	28.	1,00833	43.	1,38504		
14.	2,18175	29.	1,904	44.	1,11666		
15.	1,73545	30.	2,11666	45.	1,15853		

Statistické výpočty částic nečistot potřebných pro vytvoření histogramu jejich zastoupení v oleji

rel.četnost = počet částic třídy/celkový počet částic [-]

abs.četnost = (rel.četnost/šířka třídy)*100 [%]

Vzorek oleje před filtrem:

třída	počet částic	rel.četnost	abs.četnost
0,5-1	10	0,1	20
1-1,5	19	0,19	38
1,5-2	21	0,21	42
2-2,5	14	0,14	28
2,5-3	6	0,06	12
3-3,5	10	0,1	20
3,5-4	9	0,09	18
4-4,5	4	0,04	8
4,5-5	3	0,03	6
5-5,5	1	0,01	2
5,5-6	1	0,01	2
6-6,5	1	0,01	2
6,5-7	0	0	0
7-7,5	1	0,01	2
suma	100		

Vzorek oleje za filtrem 6:

třída	počet částic	rel.četnost	abs.četnost
0,5-1	10	0,37037037	74,0740741
1-1,5	13	0,48148148	96,2962963
1,5-2	4	0,14814815	29,6296296
2-2,5	0	0	0
2,5-3	0	0	0
3-3,5	0	0	0
3,5-4	0	0	0
suma	27		

Vzorek oleje za filtrem 9:

třída	počet částic	rel.četnost	abs.četnost
0,5-1	10	0,294118	58,82353
1-1,5	18	0,529412	105,8824
1,5-2	6	0,176471	35,29412
2-2,5	0	0	0
2,5-3	0	0	0
3-3,5	0	0	0
3,5-4	0	0	0
suma	34		

Vzorek oleje za filtrem 11:

třída	počet částic	rel.četnost	abs.četnost
0,5-1	10	0,192308	38,46154
1-1,5	19	0,365385	73,07692
1,5-2	15	0,288462	57,69231
2-2,5	6	0,115385	23,07692
2,5-3	2	0,038462	7,692308
3-3,5	0	0	0
3,5-4	0	0	0
suma	52		

